



**BADANIA PORÓWNAWCZE DZIAŁANIA SPŁONEK ELEKTRYCZNYCH
W FUNKCJI MOCY IMPULSU POBUDZAJĄCEGO**
**COMPARATIVE EXAMINATIONS OF ELECTRIC PRIMERS ACTION
AS A FUNCTION OF INITIATING PULSE POWER**

Andrzej FARYŃSKI, Romuald KAŻMIERCZAK, Tomasz KWAŚNIAK,
Edward OLEJNICZAK, Ryszard URBANIAK, Zbigniew ZIÓLKOWSKI
Inżynier 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

DOI 10.5604/01.3001.0013.1676

Streszczenie: Badano inicjowanie spłonek elektrycznych impulsami o stałej energii i 3 poziomach mocy: $P \sim 1$ W, $P \sim 1$ kW do $P \sim 1$ MW. Porównywano działanie spłonek z mostkiem metalicznym połączonych z zapłonikiem (SI), pobudzanych ze stałą energią dysponowaną ok. 20 mJ i spłonek z rezystancją rozłożoną w mieszaninie pirotechnicznej (SII), pobudzanych ze stałą energią dysponowaną ok. 200 mJ. Zobrazowano kilkukrotne „podimpulsy” prądowe prowadzące do jednego pobudzenia SII. Średnie opóźnienie zadziałania malało od 8,7 ms przy $P \sim 1$ W do 133 μ s przy $P \sim 1$ MW dla SI oraz od ok. 90 μ s przy $P \sim 1$ kW do ok. 50 μ s przy $P \sim 1$ MW dla SII, przy czym od $P \sim 1$ kW dla obu rodzajów spłonek praktycznie nie zmieniało się. Przedyskutowano mechanizmy pobudzenia i czynniki wpływające na mierzone opóźnienia. Wyznaczono średnie energie pochłonięte do chwili zadziałania: 5 – 7 mJ dla SI, ok. 15 mJ dla SII. Oszacowano końcowe ciśnienia: 300 – 400 bar w korpusach spłonek/ zapłonników.

Słowa kluczowe: fizyka wybuchu, spłonka elektryczna, zwłoka czasowa, energia wejściowa dysponowana, energia pochłonięta

1. Wstęp

Opisywane badania dotyczyły dwóch rodzajów spłonek małokalibrowych naboju artyleryjskich, pobudzanych energią elektryczną:

Abstract: Initiation of electric primers by pulses of constant energy at 3 different levels of power from $P \sim 1$ W to $P \sim 1$ MW was investigated. Actions of primers with metallic electric bridge (SI) connected to an exploder and initiated by permanent disposable energy of ca. 20 mJ were compared to primers with the resistance distributed within a pyrotechnic mixture (SII) initiated by permanent disposable energy of ca. 200 mJ. A series of current “sub-pulses” at one activation of SII is shown. Average delay of activation was reduced from 8.7 ms at $P \sim 1$ W to 133 μ s at $P \sim 1$ MW for SI, and from ca. 90 μ s at $P \sim 1$ kW to ca. 50 μ s at $P \sim 1$ MW for SII, to be in practice unchangeable above $P \sim 1$ kW for two types of primers. Mechanisms of initiation and factors influencing the measured delays were discussed. Average energies absorbed to the moment of activation were determined: 5 – 7 mJ for SI, and ca. 15 mJ for SII. Final pressures inside the casing of primers/ igniters were estimated on the level of 300 – 400 bar.

Keywords: physics of explosion, electric primer, time delay, disposable input energy, absorbed energy

1. Introduction

Described experiments concern two following types of low calibre artillery cartridges initiated by electric energy:

- SI – spłonek naboju do działek GSz-301 kalibru 30 mm z mieszanych roczników 1987-1994, w których pierwotna energia była dostarczana do mieszaniny pirotechnicznej (MP) z mostka metalicznego rozgrzewanego przez przepływ prądu elektrycznego,
- SII – spłonek M52A3B1 [1] naboju do działek Vulcan kalibru 20 mm rocznika 2007, w których pierwotna energia wydzielana się na rozproszonej własnej rezystancji samej mieszaniny pirotechnicznej.

Spłonka SI połączona była konstrukcyjnie z dodatkową masą zapalającą, stanowiącą tabletkę o średnicy ok. 9 mm i grubości ok. 6 mm w jeden węzeł, tworzący zapłonnik EKW-30M; MP spłonki SII o średnicy ok. 7 mm i grubości ok. 2 mm stanowiła jednocześnie tabletkę zapłonnikową. Dlatego w dalszym ciągu używać się będzie zamiennie terminu „spłonka” lub/i „zapłonnik”.

Opisane próby, mające głównie aspekt poznawczy, prowadzono w celu zbadania własności spłonek w szerszym zakresie warunków pobudzenia, a w szczególności sprawdzenia:

- jak zachowuje się zwłoka (opóźnienie czasowe) zadziałania łańcucha: spłonka + zapłonnik w zależności od mocy (napięcia) pobudzenia,
- możliwości oszacowania elektrycznej energii pochłoniętej do chwili zadziałania,
- możliwości oszacowania prędkości reakcji chemicznych w łańcuchu: MP spłonki – substancja czynna zapłonnikowa.

Według wiedzy autorów wspomniane wyżej własności omawianych spłonek (SI i SII) nie były dotychczas w Polsce badane. Spośród nich – zwłoka zadziałania jest istotnym parametrem dla prawidłowego działania działek Vulcan, w których powinna ona być znacznie mniejsza od czasu między dojściem do pozycji strzałowej kolejnych luf, który to czas jest sztywno określony przez prędkość obrotową silnika napędzającego zespół luf. Praca [1] zwraca uwagę na selekcję spłonek do tej amunicji pod kątem minimalizacji zwłoki zadziałania.

- SI – primers for cartridges of 30 mm calibre GSz-301 guns originating from years 1987-1994 for which the initial energy was delivered to a pyrotechnic mixture (MP) from a metallic bridge heated by the flow of electric current,
- SII – primers M52A3B1 [1] for cartridges to 20 mm Vulcan gun originating from 2007, for which the initial energy was dissipated on own distributed resistance of this pyrotechnic mixture.

Primer SI was structurally connected with an additional igniting mixture, having a form of a capsule of ca. 9.0 mm diameter and ca. 6 mm thickness, into a single unit creating the igniter EKW-30M, whereas the MP of SII primer, with the diameter ca. 7 mm and thickness ca. 2 mm, was also the igniter's capsule. For this reason the terms “primer” and “igniter” will be used later on a reciprocal base.

Described trials were aimed to investigate the properties of primers on the wider range of excitation conditions and specifically to check:

- Behaviour of time delay for the train of operations: primer + igniter, depending on power (voltage) of initiation,
- Possibility for estimation of the electric energy absorbed until the moment of activation,
- Possibility for estimation of the rate of chemical reactions on the train: MP of the primer – active composition of the igniter.

According to authors' knowledge the above mentioned properties of discussed primers (SI and SII) have not been investigated in Poland yet. Among them, the delay of activation is an essential parameter for proper operation of Vulcan guns, where it should be significantly less than the time needed for achieving the firing positions by successive barrels which depends directly on the rotating rate of a motor driving the system of barrels. Publication [1] brings the attention to selection of primers for this ammunition to minimise the delay of activation.

Badane spłonki stanowiły całość z łuskami naboju miotających. W obu wypadkach substancja czynna zapłonika oddzielona była od wnętrza łuski metalową membraną, która była ścinana przez produkty reakcji MP.

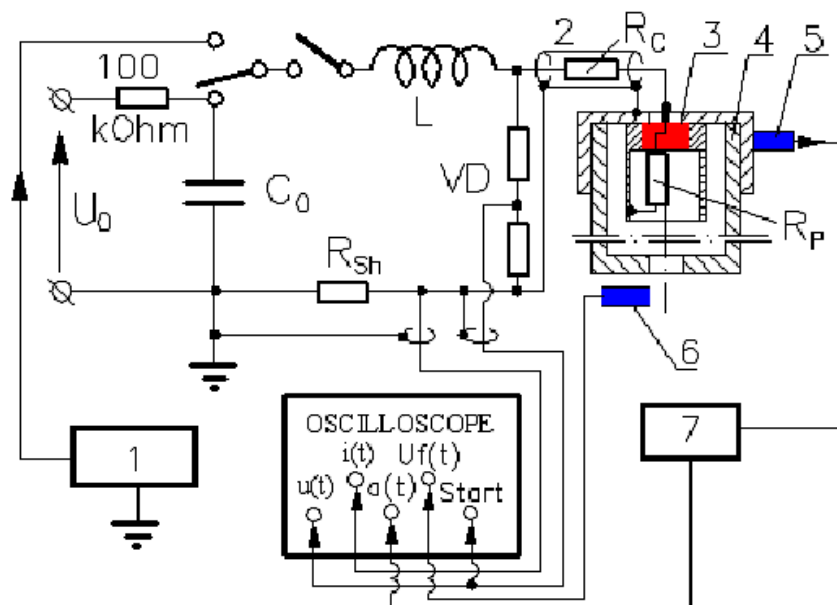
2. Układ badawczy i procedura badań

Schemat stanowiska badawczego pokazano na rys. 1.

The studied primers were embedded in cases of projecting cartridges. Igniter's active mixture in both versions was separated from the case inside by a metallic membrane sheared by MP reactions products.

2. Testing Setup and Procedure

A layout of testing setup is shown in Fig. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – generator stabilizowanego prądu, 2 – przewód koncentryczny, 3 – spłonka w łusce, 4 – komora wybuchowa, 5 – akcelerometr, 6 – fotodioda, 7 – zasilacz czujników piezoelektrycznych; C_0 – pojemność kondensatora zapalarki zmiennoprądowej, U_0 – napięcie początkowe naładowanego kondensatora, R_{Sh} – rezystancja bocznika prądowego, VD – dzielnik napięciowy, L – indukcyjność obwodu wyładowania pobudzającego, R_C – rezystancja przewodu koncentrycznego, R_P – rezystancja spłonki

Fig. 1. Experimental setup: 1 – stabilized current generator, 2 – concentric cable, 3 – primer in cartridge case, 4 – explosion chamber, 5 – accelerometer, 6 – photodiode, 7 – piezoelectric sensor supply, C_0 – variable current exploder capacitor, U_0 – charged capacitor initial voltage, R_{Sh} – current shunt resistance, VD – voltage divider, L – initiation discharge circuit inductance, R_C – concentric cable resistance, R_P – primer resistance

Łuski umieszczano, w celu pobudzenia spłonek, w komorze wybuchowej zaopatrzonej w styki doprowadzające prąd elektryczny i otwór umożliwiający obserwację optyczną. Komorę łączono z zapalarką za pomocą przewodu koncentrycznego o impedancji falowej 50 Ohm. Ze względów konstrukcyjnych natężenie prądu w obwodzie odpalania $i(t)$ i sumaryczne napięcie $u(t)$ na spłonce i doprowadzeniach, w tym na przewodzie łączącym,

For initiation of the primers the cases were placed in a blast chamber fitted with connectors supplying the electric current and an opening for optical observation. The chamber was connected with exploder by a concentric cable of 50 Ohm wave impedance. The intensity of electric current $i(t)$ in the firing circuit and total voltage $u(t)$ on the primer and attached leads, on the connecting lead as well, were measured at the

mierzone przy wyjściu z zapalarki. Natężenie prądu mierzone za pomocą boczników prądowych, napięcie za pomocą dzielników napięcia. Fotodiody o autonomicznym zasilaniu, umieszczona przy otworze wylotowym z komory, generowała sygnał $U_f(t)$ odpowiadający świeceniu gazów powybuchowych przedostających się do wnętrza łuski i komory, zaczynający się po czasie Δt_{fot} (początek ścinania membrany zapłonika) od chwili podania napięcia na spłonkę ($t = 0$). Do ścianki komory przymocowany był akcelerometr jako detektor radialnych drgań komory o przyspieszeniu $a(t)$, wywołanych wybuchem, pojawiających się po czasie Δt_{acc} od $t = 0$. Fotodiody i akcelerometry były odizolowane elektrycznie od korpusu komory.

Badane spłonki pobudzano impulsami z dwu rodzajów urządzeń zasilających (zapalarek): „Z1” – generatora skoku napięcia 27 V o czasie trwania do 150 ms (impuls zbliżony do występujących w czasie eksploatacji), zapewniającego quasiprostokątny impuls stabilizowanego w czasie prądu pobudzania o regulowanej wartości natężenia I_0 i „Z2” – opartego o rozładowanie kondensatora C_0 o początkowej energii dysponowanej E_0 , stałej w przybliżeniu dla danego typu spłonki i wystarczająco dużej, by zapewnić pobudzenie praktycznie za każdym razem. I tak, dla spłonek SI wybrano $E_0 = 20 \pm 5$ mJ, zaś dla spłonek SII - $E_0 = 200 \pm 50$ mJ. Przyjmując znacznie większe E_0 w tym drugim wypadku, kierowano się potrzebą zapewnienia dużej niezawodności zadziałania przy nieznanym poziomie przewodnictwa elektrycznego MP przy niskich napięciach. Moc impulsu zmieniano poprzez zmianę pojemności kondensatorów zapalarek i napięcia U_0 ich ładowania.

Obwód pobudzania budowano, mając na uwadze minimalizację zniekształceń rejestrowanych przebiegów, indukowanego w elementach pomiarowych przez przepływ prądu oraz efekty naskórkowe. Przy każdym poziomie mocy parametry jego elementów były inne, co zostanie podane w punkcie 3.

Rejestrację wszystkich przebiegów czasowych: prądu $i(t)$ w obciążeniu i napięcia $u(t)$ na nim, sygnału $U_f(t)$ z fotodiody wywołanego świeceniem spłonki/ zapłonika

exploder output due to designing reasons. The intensity of current was measured by current shunts, and voltage by the voltage dividers. A self-powered photodiode was placed at the chamber outlet to generate signal $U_f(t)$ of a flashing of post-explosion gases travelling into the inside of the case and chamber, which starts within time Δt_{fot} (beginning of igniter membrane breaking) after the moment when the voltage is applied to the primer ($t = 0$). An accelerometer was fixed to the chamber wall to detect its radial vibrations with acceleration $a(t)$ triggered by the blast and appearing after the time Δt_{acc} after $t = 0$. The photodiode and accelerometer were electrically isolated from the chamber frame.

Investigated primers were stimulated by the pulses originating from two types of powering units (exploders): „Z1” – generator of 27 V voltage surge with duration up to 150 ms (the pulse is similar to those used in practice) providing a quasi-rectangular pulse of initiating current, stabilised in time, with controlled intensity I_0 , and „Z2” – based on condenser C_0 discharge at the original disposable energy E_0 which is approximately permanent for a particular type of the primer and sufficiently high to secure each time initiation in practice. For primers SI it was accepted $E_0 = 20 \pm 5$ mJ, and for primers SII - $E_0 = 200 \pm 50$ mJ. The level of E_0 was taken to be significantly greater to provide high dependability of activation at unknown level of electric conductivity for the MP at low voltages. The power of the pulse was changed through the changes of condensers capacity and the charging voltage U_0 .

The excitation circuit was built to secure a minimal level of recorded signals distortions which are induced in measurement components by the flow of electric current and eddy effects. Parameters of its components were different at each level of power, and they are presented in point 3.

Digital oscilloscope recorded signals changing in time: current $i(t)$ in the load and voltage $u(t)$ on it, signal $U_f(t)$ from the photodiode caused by a flash of the primer/

i przyspieszenia radialnego $a(t)$ komory wybuchowej prowadzono za pomocą oscyloskopu cyfrowego. Każda zapalarka zapewniała synchronizację chwili przyłożenia napięcia i początku przepływu prądu ($t = 0$) ze startem podstawy czasu oscyloskopu. Bieżącą rezystancję spłonki i moc pochłaniania energii przez spłonkę (z wyjątkiem prób przy $U_0 = 5$ kV) wyznaczano ze wzorów odpowiednio: $R_p(t) = u(t) / i(t) - R_c$, $P(t) = R_p(t) i^2(t)$. Energię pochłoniętą do chwili zadziałania wyznaczano jako $E_{abs} = \int_0^{\min(\Delta t_{acc}, \Delta t_{fot})} P(t) dt$.

Każdy rodzaj spłonek/ zapłonników badano przy 3 poziomach mocy maksymalnej P_{max} impulsu pobudzającego; na każdym poziomie użyto ok. 10 spłonek.

3. Prezentacja wyników pomiarów

3.1. Spłonki rodzaju SI

Początkowa (statyczna) rezystancja mostka inicjującego zapłon MP wynosiła $R_p \approx 1$ Ohm. Wartości parametrów związanych z pobudzaniem spłonek wyznaczone w niżej opisanych pomiarach zamieszczono w tabelach 1 i 2.

igniter, and radial acceleration $a(t)$ of the blasting chamber. Each exploder provided synchronisation of a moment of voltage application and beginning of current flow ($t = 0$) with the start of oscilloscope time base. Primer instant resistance and power of energy absorption by the primer (apart from trials at $U_0 = 5$ kV) was determined by expressions: $R_p(t) = u(t) / i(t) - R_c$, $P(t) = R_p(t) i^2(t)$ respectively. The energy absorbed until the time of activation was determined as $E_{abs} = \int_0^{\min(\Delta t_{acc}, \Delta t_{fot})} P(t) dt$.

Each type of primer/ igniter was tested at 3 levels of maximal power P_{max} of the exciting pulse, and for each level ca. 10 primers were spent.

3. Presentation of Measurement Results

3.1. Primers of SI Type

Original (static) resistance of the bridge initiating the ignition of MP was $R_p \approx 1$ Ohm. Values of parameters connected with excitation of primers, established at below described measurements, are presented in tables 1 and 2.

Tabela 1. Skrajne i średnie wartości parametrów spłonek/ zapłonników pobudzanych w trakcie prowadzonych badań

Table 1. Extreme and average values of parameters for primers/ igniters initiated at conducted tests

		I_{max}	P_{max}	E_{abs}
		A	kW	mJ
SI 25 V	max	0.8	0.00088	21.7
	min	0.45	0.00027	2.7
	average		0.00059	5.5
SI 300 V	max	81.0	3.55	10.9
	min	49.0	2.21	4.7
	average	65.8	2.85	7.1
SI 5000 V	max	134	735	
	min	120	467	
	average	128	566	20
SII 160 V	max	76.5	9.28	18.6
	min	4.9	1.08	11.5
	average	7.6	1.88	15.3
SII 300 V	max	33	6.98	109
	min	23	6.06	64
	average	27	6.45	63

Cd. Tabeli 1 / Cont. Table 1

SII 5000 V	max	394	3310	
	min	346	1970	
	average	365	2480	200

Tabela 2. Skrajne i średnie wartości parametrów spłonek/ zapłonników pobudzanych w trakcie prowadzonych badań

Table 2. Extreme and average values of parameters for primers/ igniters initiated at conducted tests

		Δt_{acc}	Δt_{tot}	L	R_{pmin}
		μs	μs	μH	Ω
SI 25 V	max	80200			1.3
	min	4920			2.2
	average	8720			
SI 300 V	max	207	258		1.0
	min	58	116		0.6
	average	112	179		
SI 5000 V	max	188	390	2.4*)	9.6 *)
	min	90	156	2.2*)	4.0 *)
	average	133	229	2.3*)	5.8 *)
SII 160 V	max	92	94		25.8
	min	54	67		11.3
	average	63	69		19.8
SII 300 V	max	66	66		9.9
	min	48	58		3.5
	average	55	63		6.8
SII 5000 V	max	64	76	2.1*)	4.1 *)
	min	44	59	1.7*)	2.9 *)
	average	50	65	2.0*)	3.3 *)

R_{pmin} – minimalna wartość rezystancji spłonki; *) – wartości uśrednione po czasie przebiegu wyładowania o kształcie gasnącej sinusoidy - R_{pmin} jest tu rezystancją całego obwodu;

R_{pmin} – minimal value of primer resistance; *) – values averaged after expiration of damped sinusoid discharging signal - R_{pmin} is the resistance of the overall circuit;

3.1.1. Maksymalna moc impulsu pobudzenia $P_{max} \sim 1 W$

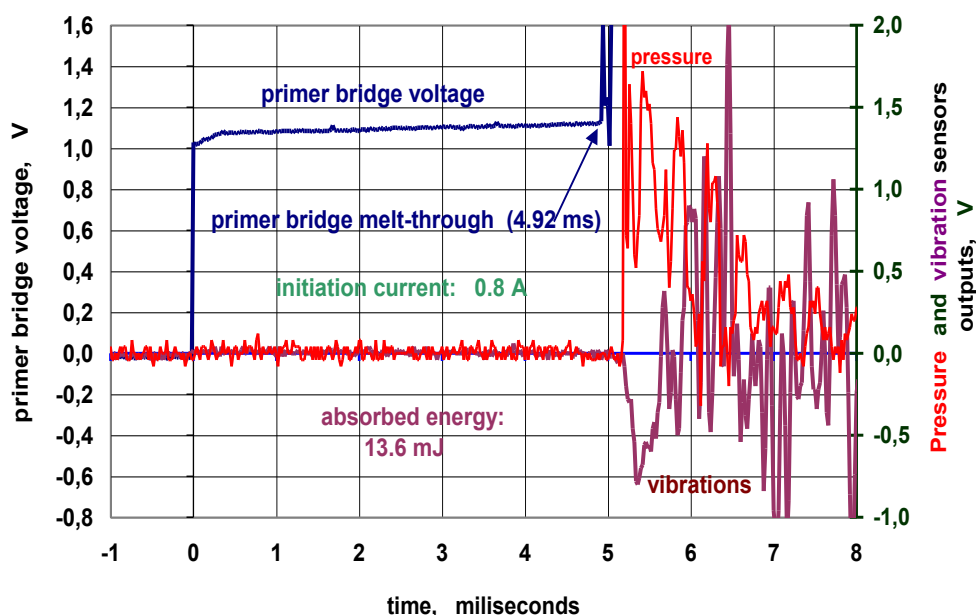
Użyto zapalarki Z1. Detekcja wybuchu - akcelerometr i czujnik ciśnienia umieszczony przy wylocie otworu obserwacyjnego. Wykonano serię prób przy $I_0 = 0,45 \div 0,8 A$. Przykładowe przebiegi napięcia na linii odpalania (mostku), sygnałów $a(t)$ i czujnika ciśnienia pokazano na rys. 2. Skok napięcia zasilania odpowiadał momentowi przepalenia mostka, który można było przyjąć za początek reakcji

3.1.1. Maximal Power of Excitation Pulse $P_{max} \sim 1 W$

Detonator Z1 was used. Detection of blast – accelerometer and pressure sensor placed at the outlet of observation hole. A series of trials was performed for $I_0 = 0.45 \div 0.8 A$. Exemplary plots of voltage on the firing line (bridge), signals $a(t)$ and from the pressure sensor are shown in Fig. 2. The surge of powering voltage corresponded to bridge blowing what may be taken as

chemicznej w MP; początek impulsów drgań ścianek i ciśnienia oznaczał ścinanie membrany.

a start of chemical reaction in MP; initial pulses of wall vibrations and pressure stand for breaking of the membrane.



Rys. 2. SI; Przebiegi napięcia na mostku spłonki (primer bridge voltage), drgań ścianek komory wybuchowej (vibrations) i ciśnienia gazów na wylocie z komory (pressure); podano wartość energii pochłoniętej do chwili zadziałania

Fig. 2. SI; Time profiles of primer bridge voltage, explosion chamber wall vibrations and of pressure at chamber outlet; energy absorbed to the primer action was given

3.1.2. Maksymalna moc impulsu pobudzenia $P_{\max} \sim 1 \text{ kW}$

Wykorzystano zapalarkę Z2 o $C_0 = 0,45 \mu\text{F}$, $U_0 = 300 \text{ V}$, $R_C = 0,7 \text{ Ohm}$, $R_{Sh} = 0,186 \text{ Ohm}$, dzielniku napięcia 1:10. Na rys. 3 pokazano przykład przebiegów w czasie $U_f(t)$ i $a(t)$, wywołanych przez działanie spłonki na tle napięcia $u(t)$ i prądu $i(t)$, na rys. 4 – przebiegi $u(t)$, $i(t)$, $R_p(t)$ i energii wydzielonej w spłonce, dotyczące tego samego strzału.

3.1.3. Maksymalna moc impulsu pobudzenia $P_{\max} \sim 1 \text{ MW}$

Zastosowano zapalarkę Z2 o $C_0 = 1,56 \text{ nF}$, $U_0 = 5,2 \pm 0,3 \text{ kV}$, $R_C = 0,45 \text{ Ohm}$, $R_{Sh} = 0,186 \text{ Ohm}$, dzielniku napięcia 1:1670. Napięcie z bocznika R_{Sh} podawano na oscyloskop przez dzielnik 1:10. Na rys. 5 pokazano przykładowe przebiegi w czasie $U_f(t)$ i $a(t)$, wywołanych przez działanie spłonki, na

3.1.2. Maximal Power of Initiation Pulse $P_{\max} \sim 1 \text{ kW}$

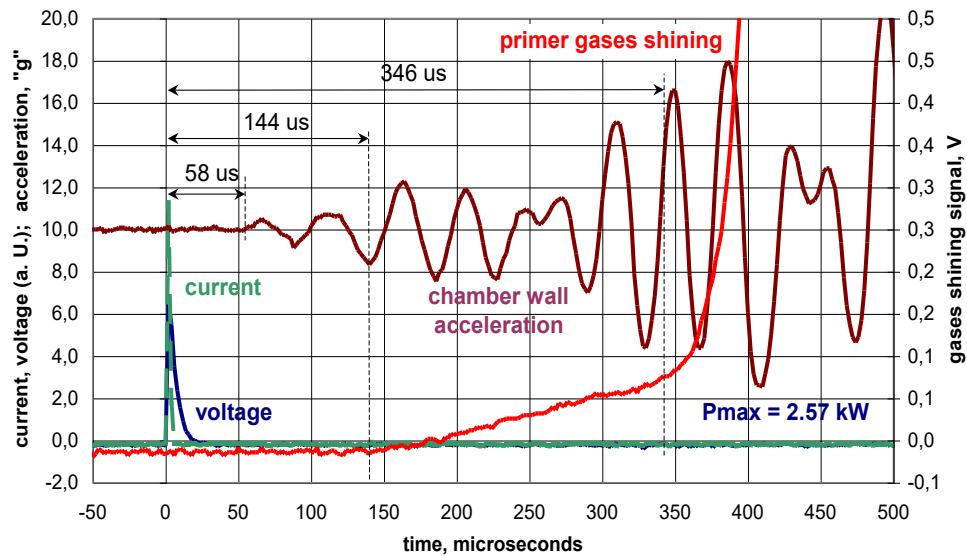
Exploder Z2 was used with $C_0 = 0.45 \mu\text{F}$, $U_0 = 300 \text{ V}$, $R_C = 0.7 \text{ Ohm}$, $R_{Sh} = 0.186 \text{ Ohm}$, voltage divider 1:10. Fig. 3 shows an example of plots against time for $U_f(t)$ and $a(t)$, effected by action of the primer, on the background of voltage $u(t)$ and current $i(t)$, and Fig. 4 shows the signals $u(t)$, $i(t)$, $R_p(t)$ and the energy absorbed by the primer recorded for the same shot.

3.1.3. Maximal Power of Initiation Pulse $P_{\max} \sim 1 \text{ MW}$

Exploder Z2 was used with $C_0 = 1.56 \text{ nF}$, $U_0 = 5.2 \pm 0.3 \text{ kV}$, $R_C = 0.45 \text{ Ohm}$, $R_{Sh} = 0.186 \text{ Ohm}$, voltage divider 1:1670. The voltage from the R_{Sh} shunt was sent to oscilloscope via divider 1:10. Fig. 5 shows an example of plots $U_f(t)$ and $a(t)$ against time effected by action of the primer and

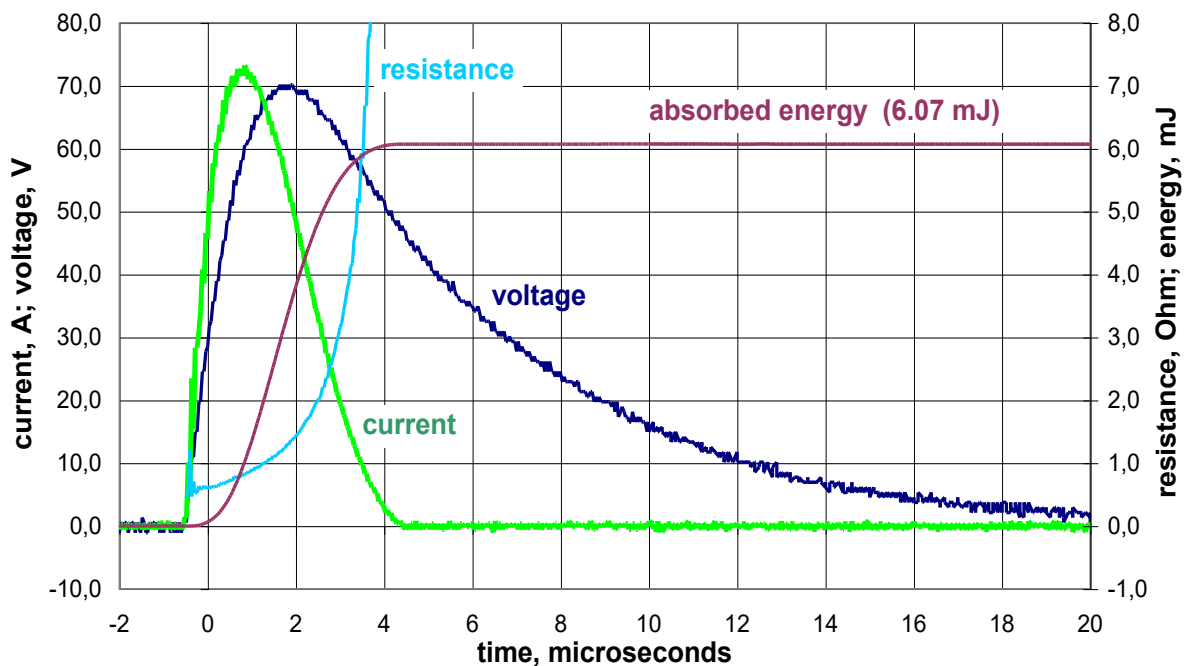
rys. 6 – przebiegi $u(t)$ i $i(t)$ w tym samym strzale.

Fig. 6 shows the signals $u(t)$, $i(t)$ for the same shot.



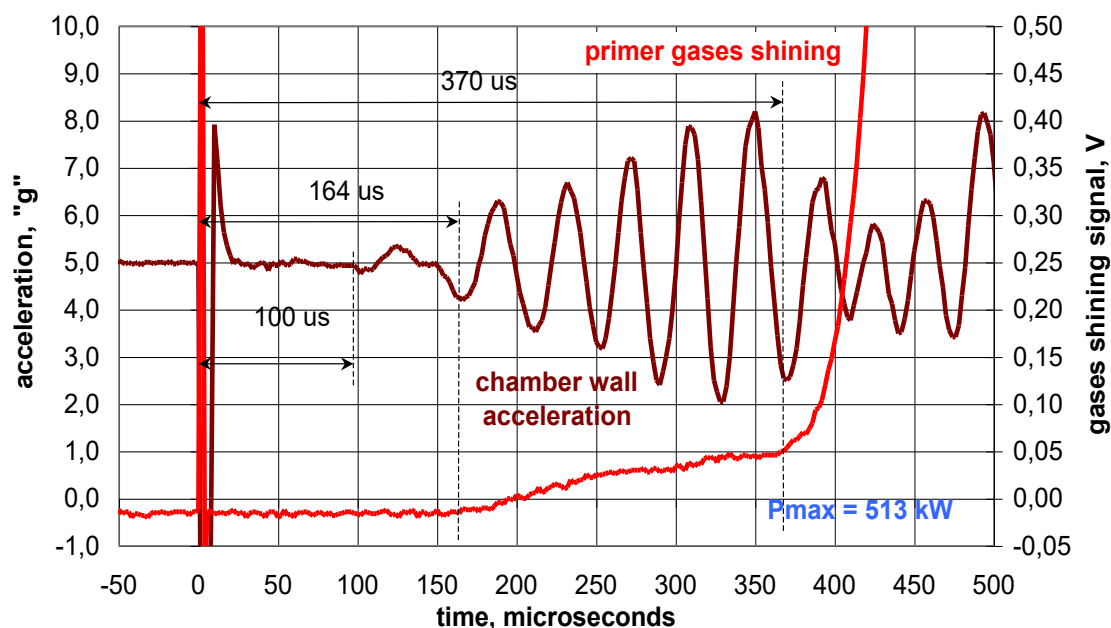
Rys. 3. SI; Drgania ścianek komory wybuchowej (chamber wall acceleration) i świecenia gazów powybuchowych (primer gases shining) na tle przebiegów napięcia i natężenia prądu; oznaczono charakterystyczne punkty czasowe i podano maksymalną wartość mocy przesyłanej energii (Shot 17)

Fig. 3. SI; Explosion chamber wall vibration (acceleration) and primer gases shining against the background of current and voltage profiles; characteristic time points and maximum power of transferred energy are given (Shot 17)



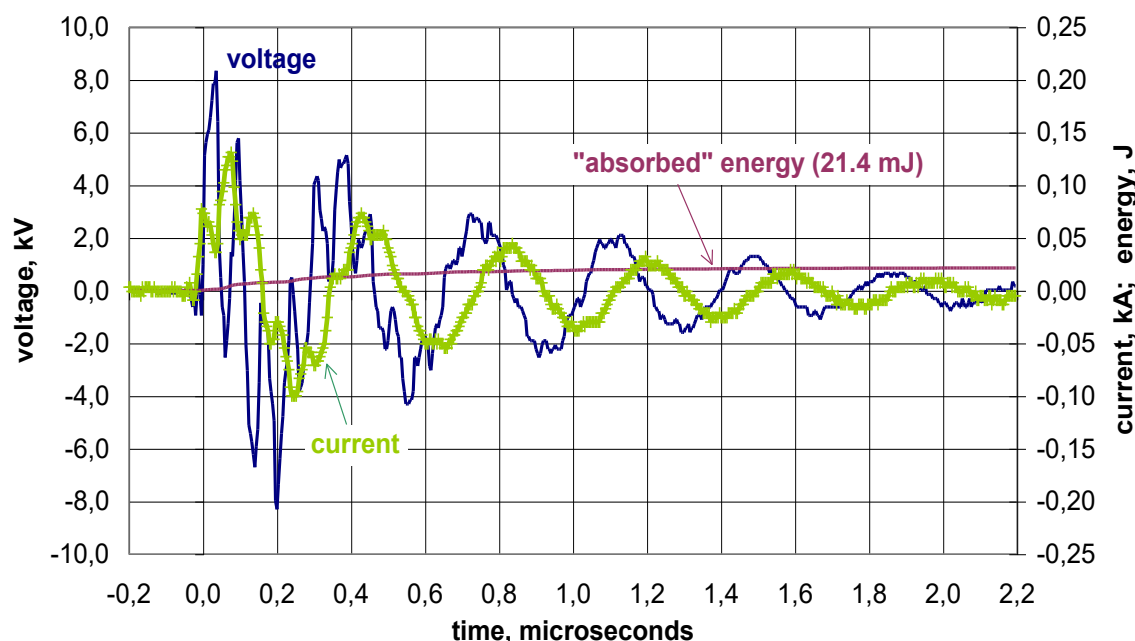
Rys. 4. SI; Przebiegi napięcia, prądu, rezystancji spłonki oraz energii, pochłanianej przez spłonkę w czasie strzału (Shot 17) z rys. 3

Fig. 4. SI; Voltage, current, primer resistance and absorbed energy for the shot of Fig. 3



Rys. 5. SI; Przebiegi drgań ścianek komory wybuchowej i świecenia gazów powybuchowych na tle przebiegów napięcia i natężenia prądu; (Shot 21)

Fig. 5. SI; Explosion chamber wall vibration and primer gases shining time profiles on the background of voltage and current signals (Shot 21)



Rys. 6. SI; Przebiegi napięcia i natężenia prądu w czasie strzału z rys. 5. Zaznaczono przebieg energii wydzielanej na zastępczej rezystancji obwodu – patrz punkt 4.1.2 (Shot 21)

Fig. 6. SI; Voltage, current and absorbed energy for the shot of Fig. 5. The change of energy absorbed by circuit equivalent resistance is shown – see point 4.1.2 (Shot 21)

3.2. Spłonki rodzaju SII

Statyczne początkowe (niskonapięciowe) rezystancje spłonek zawierały się w przedzia-

3.2. Primers of SII Type

Initial static (low-voltage) resistances of primers were in the interwall of

le $R_p = 4,2 \div 57 \text{ k}\Omega$. Próby rozpoczęto przy wyższym napięciu, niż przy SI, by zapewnić dużą niezawodność pobudzenia. Wartości parametrów związanych z pobudzeniem spłonki wyznaczone w niżej opisanych pomiarach zamieszczono w tabelach 1 i 2.

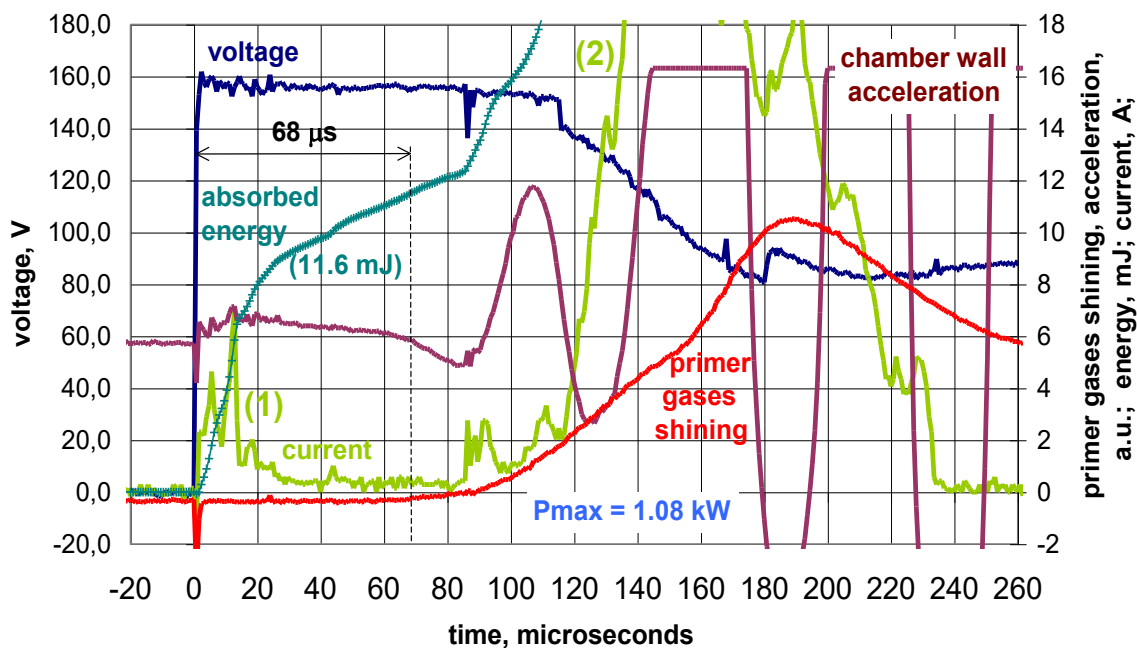
3.2.1. Maksymalna moc impulsu pobudzenia $P_{\max} \sim 1 \text{ kW}$

Wykorzystano zapalarkę Z2 o $C_0 = 16,9 \mu\text{F}$, $U_0 = 160 \text{ V}$, $R_C = 0,183 \text{ }\Omega$, $R_{Sh} = 0.138 \text{ }\Omega$, dzielniku napięcia 1:1500. Na rys. 7 pokazano przykładowe przebiegi w czasie $u(t)$, $i(t)$, energii pochłanianej przez spłonkę, $U_f(t)$ i $a(t)$, wywołanych przez działanie spłonki; na rys. 8 (fragment rys. 7) – przebiegi $u(t)$, $i(t)$ i $R_p(t)$ do chwili zadziałania spłonki w tym samym strzale; na rys. 9 – przebieg $i(t)$ w tym samym strzale na tle całkowitego przebiegu $U_f(t)$ spłonki (zaznaczono części $i(t)$: użyteczną (1) i jałową (2)).

$R_p = 4.2 \div 57 \text{ k}\Omega$. The trials were started at a higher voltage than for SI to provide high dependability of initiation. Values of parameters connected with the initiation of primers and determined by below measurements are presented in tables 1 and 2.

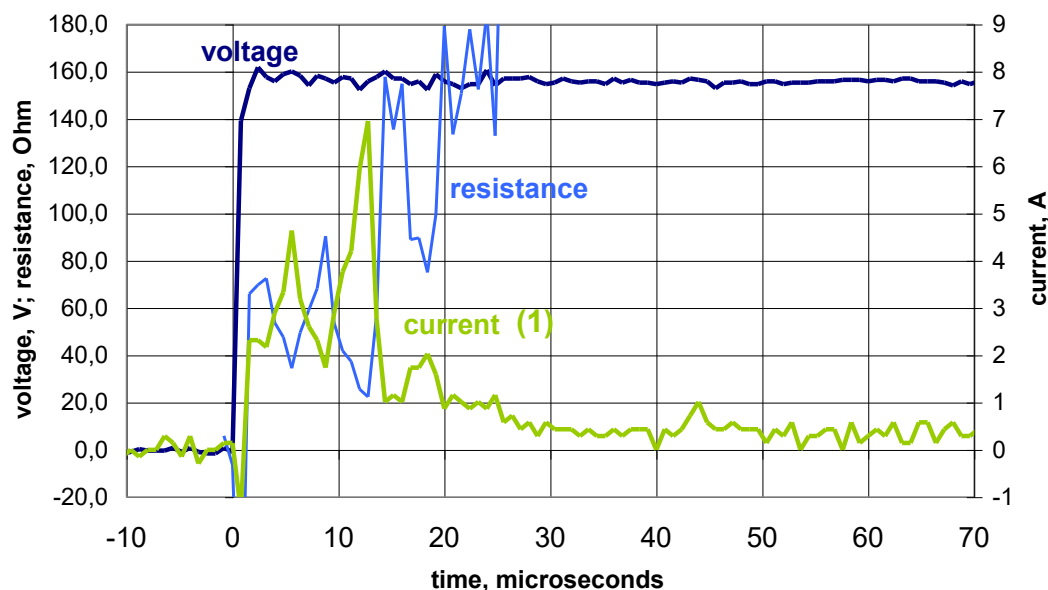
3.2.1. Maximal Power of Initiation Pulse $P_{\max} \sim 1 \text{ kW}$

Exploder Z2 was used with $C_0 = 16.9 \mu\text{F}$, $U_0 = 160 \text{ V}$, $R_C = 0.183 \text{ }\Omega$, $R_{Sh} = 0.138 \text{ }\Omega$, voltage divider 1:1500. Fig.7 shows an example of $u(t)$, $i(t)$ plots against time, the energy absorbed by the primer, $U_f(t)$ and $a(t)$, effected by action of the primer, Fig. 8 (fragment of Fig. 7) shows – plots $u(t)$, $i(t)$ and $R_p(t)$ to the moment of primer activation for the same shot, Fig. 9 shows the plot $i(t)$ for the same shot on the background of primer's overall plot $U_f(t)$ (efficient (1) and idle (2) components of $i(t)$ are marked).



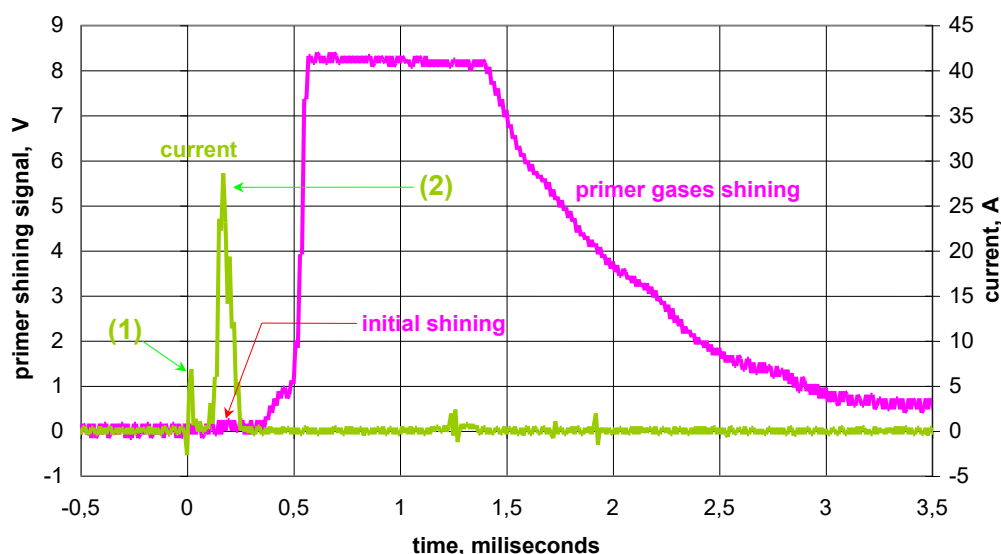
Rys. 7. SII; Przebiegi napięcia i natężenia prądu, drgań ścianek komory wybuchowej, świecenia gazów powybuchowych i pochłanianej energii; oznaczono zwłokę zadziałania i maksymalną wartość mocy przesyłanej energii; (1) – część impulsu prądu odpowiedzialna za pobudzenie, (2) – jałowa część impulsu płynąca przez gazy powybuchowe (Shot 3)

Fig. 7. SII; Curves of voltage, current, explosion chamber wall vibrations, primer gases shining and absorbed energy; time delay and maximum power of transferred energy were given; (1) – part of current pulse responsible for the initiation, (2) – useless part of current pulse flowing through the post-explosion gases (Shot 3)



Rys. 8. SII; Przebiegi napięcia na spłonce, natężenia prądu i rezystancji spłonki do chwili jej zadziałania – wycinek rys. 7 (Shot 3)

Fig. 8. SII; Voltage, current and primer resistance to the moment of action beginning for the shot of Fig. 7 (Shot 3)



Rys. 9. SII; Całkowity przebieg świecenia spłonki + zapłonika na tle przebiegu prądu – odniesienie do rys.7 i 8 (Shot 3)

Fig. 9. SII; Total primer + igniter shining course against the background of current time profile – reference to Figs. 7 and 8 (Shot 3)

3.2.2. Maksymalna moc impulsu pobudzenia $P_{\max} \sim 10 \text{ kW}$

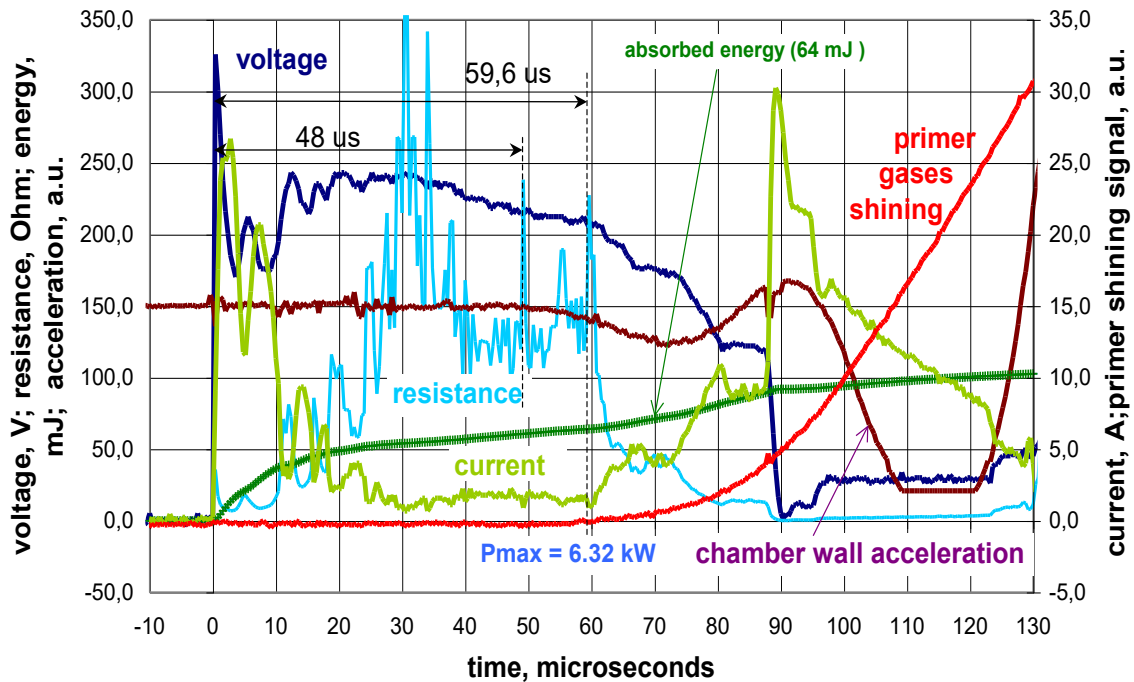
Zastosowano zapalarkę Z2 o $C_0 = 4,5 \mu\text{F}$, $U_0 = 300 \text{ V}$, $R_C = 0,183 \text{ Ohm}$, $R_{Sh} = 0,186 \text{ Ohm}$, dzielnik napięcia 1:9.6. Na rys. 10 pokazano przykładowe przebiegi w czasie $u(t)$,

3.2.2. Maximal Power of Initiation Pulse $P_{\max} \sim 10 \text{ kW}$

Exploder Z2 was used with $C_0 = 4.5 \mu\text{F}$, $U_0 = 300 \text{ V}$, $R_C = 0.183 \text{ Ohm}$, $R_{Sh} = 0.186 \text{ Ohm}$, voltage divider 1:9.6. Fig. 10 shows an example of $u(t)$, $i(t)$ plots against time, the

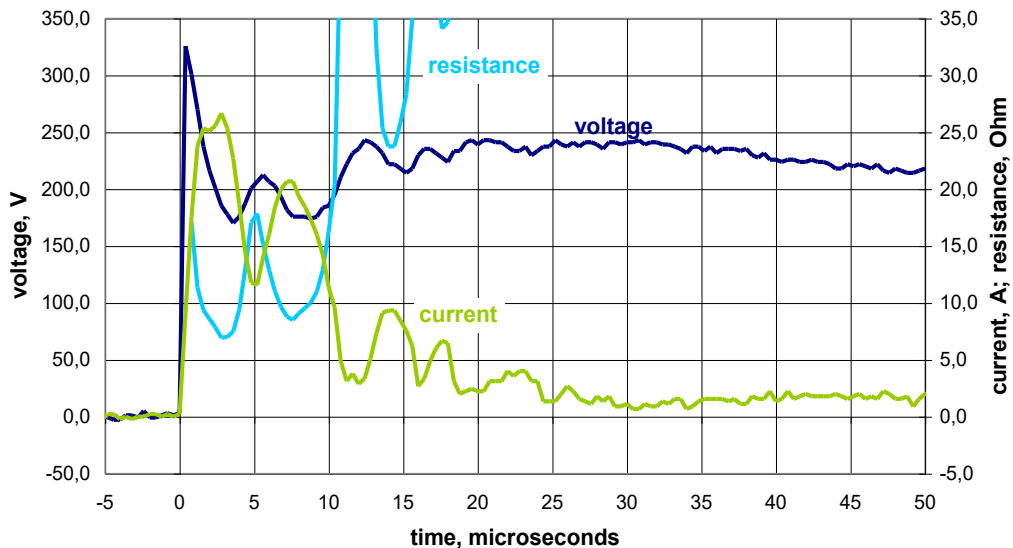
$i(t)$, energii pochłanianej przez spłonkę, $U_f(t)$ i $a(t)$; na rys. 11 - $u(t)$, $i(t)$ i $R_p(t)$ do chwili zadziałania spłonki, odpowiadające rys. 10.

energy absorbed by the primer, $U_f(t)$ and $a(t)$, Fig. 11 shows $u(t)$, $i(t)$ and $R_p(t)$ to the moment of primer activation, corresponding to Fig. 10.



Rys. 10. SII; Przebiegi napięcia i natężenia prądu, drgań ścianek komory wybuchowej, świecenia gazów powybuchowych i pochłanianej energii; oznaczono zwłokę zadziałania i maksymalną wartość mocy przesyłanej energii (Shot 9)

Fig. 10. SII; Curves of voltage, current, explosion chamber wall vibration, primer gases shining and absorbed energy; time delay and maximum power of transferred energy were given (Shot 9)



Rys. 11. SII; Przebiegi napięcia na spłonce, natężenia prądu i rezystancji spłonki do chwili jej zadziałania – wycinek rys. 10 (Shot 9)

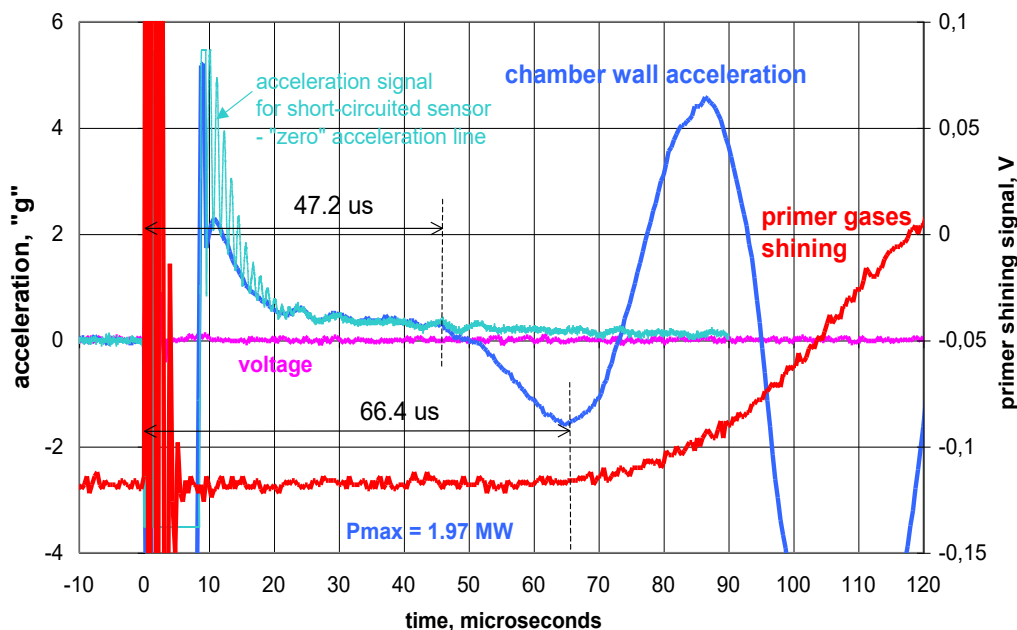
Fig. 11. SII; Voltage, current and primer resistance to the moment of action beginning for the shot of Fig. 10 (Shot 9)

3.2.3. Maksymalna moc impulsu pobudzenia $P_{\max} \sim 1 \text{ MW}$

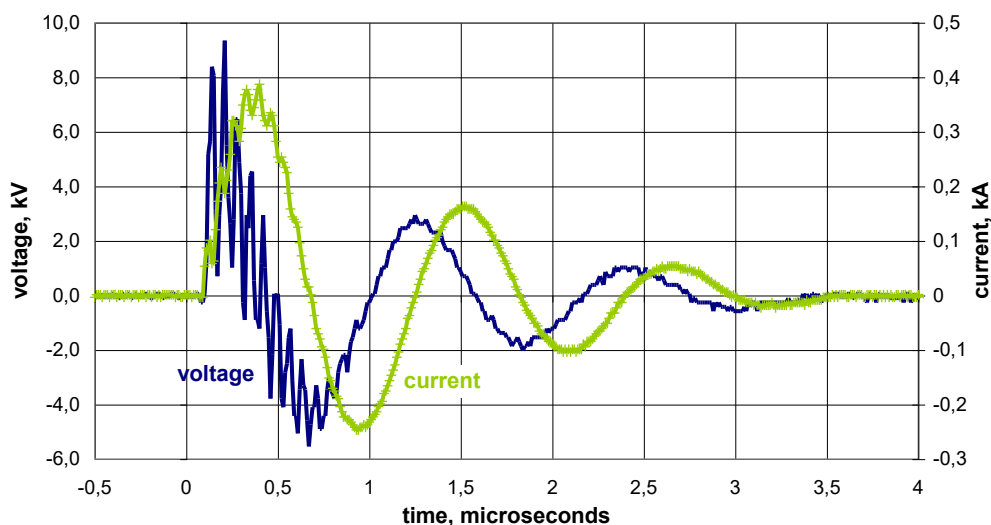
Zastosowano zapalarkę Z2 o $C_0 = 1,56 \text{ nF}$, $U_0 = 5,2 \pm 0,3 \text{ kV}$, $R_C = 0,45 \text{ Ohm}$, $R_{Sh} = 0,186 \text{ Ohm}$ (z dzielnikiem 1:10), dzielniku napięcia 1:1670. Na rys. 12 pokazano przykładowe przebiegi w czasie – $u(t)$, $i(t)$, $U_f(t)$ i $a(t)$ wywołanych przez działanie spłonki, na rys. 13 – przebiegi $u(t)$, $i(t)$ w tym samym strzale.

3.2.3. Maximal Power of Initiation Pulse $P_{\max} \sim 1 \text{ MW}$

Exploder Z2 was used with $C_0 = 1.56 \text{ nF}$, $U_0 = 5.2 \pm 0.3 \text{ kV}$, $R_C = 0.45 \text{ Ohm}$, $R_{Sh} = 0.186 \text{ Ohm}$ (divider 1:10), voltage divider 1:1670. Fig.12 shows an example of $u(t)$, $i(t)$ plots against time, $U_f(t)$ and $a(t)$ effected by action of the primer, Fig. 13 shows $u(t)$, $i(t)$ plots for the same shot.



Rys. 12. SII; Przebiegi drgań ścianek komory wybuchowej i świecenia gazów powybuchowych; oznaczono zwłokę zadziałania i maksymalną wartość mocy przesyłanej energii (Shot 3)
 Fig. 12. SII; Time profiles for explosion chamber wall acceleration and primer blasting gases shining; characteristic time points and maximum power of transferred energy were given (Shot 3)



Rys. 13. SII; Przebiegi napięcia i natężenia prądu w czasie strzału z rys. 12 (Shot 3)
 Fig. 13. SII; Voltage and current curves for the shot of Fig. 12 (Shot 3)

4. Omówienie wyników

4.1. Cechy charakterystyczne wylądowań inicjujących

4.1.1. Świecenie spłonki/ zapłonika

Przebiegi świecenia $U_f(t)$ we wszystkich przypadkach były podobne do siebie (rys. 9) i składały się z preimpulsu o niskiej amplitudzie, odpowiadającego świeceniowi gazów powybuchowych wewnątrz komory, trwającego od chwili zerwania membrany spłonki/ zapłonika do chwili dotarcia frontu gazów do otworu wylotowego (obserwacyjnego) oraz z impulsu głównego o amplitudzie ok. $100\times$ większej i połówkowym czasie trwania ok. 1,5 ms, rozpoczynającego się po ok. 0,5 ms, odpowiadającego świeceniowi gazów, które wydoszły się przez ten otwór bezpośrednio przed fotodiode. Przy odległości membrana – otwór, wynoszącej ok. 15 cm dawało to prędkość frontu gazów w komorze ok. 300 m/s.

4.1.2. Przebiegi napięcia i natężenia prądu

Rejestrowane **przy niskich mocach (do 10 kW)** przebiegi $u(t)$ i $i(t)$ były aperiodyczne, co pozwalało efektywnie wyznaczać $R_p(t)$ spłonki. Rezystancja spłonek SI (rys. 4) do momentu przzerwania mostka oporowego wzrastała w niewielkim stopniu po długim procesie grzania przy $P \sim 1W$ (rys. 2), zaś przy $P \sim 1kW$ rosła $\sim 10\times$ w ciągu kilku mikrosekund, monotonicznie i bez zakłóceń (rys. 4), co sugeruje, że mostek zamieniał się wtedy w ciecz przegrzaną o temperaturze nawet kilku tysięcy K.

W przypadku spłonek SII (rys. 8 i 11) impuls $i(t)$ do chwili ich zadziałania składał się z ciągu subimpulsów, w trakcie których R_p spłonki malała i znów narastała, co wyjaśnić można następująco (rys. 14).

Przy wystarczająco wysokim napięciu (do ok. 300 V) **na brzegu tabletki MP** (rys. 14) na styku kryształków – składników MP między elektrodami (obudową i centralnym kontaktem), po najkrótszej drodze następuje przebicie z wytworzeniem kanału prądowego DCh1, który staje się inicjatorem reakcji

4. Discussion of Results

4.1. Characteristic Features of Initiating Discharges

2.1.1. The Shining of Primer/ Igniter

The shining graphs $U_f(t)$ were similar to each other at each case (Fig.9) and were composed of a low amplitude pre-pulse, corresponding to shining of post-blast gases inside the chamber and lasting from the moment of breaking the primer/igniter membrane to the moment when the front of gases reaches the outlet (observation) hole, and of the main pulse with ca. $100\times$ greater amplitude and a half duration time of ca. 1.5 ms, starting after ca. 0.5 ms and corresponding to shining of gases which have travelled through the hole to face photodiode. For the distance membrane-hole equal to ca. 15 cm it provides the velocity of gas front inside the chamber of ca. 300 m/s.

4.1.2. Voltage and Current Values

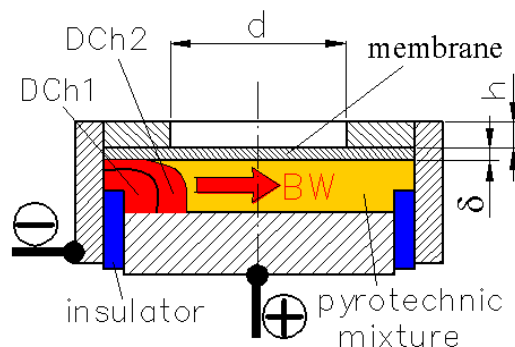
Values of $u(t)$ and $i(t)$ recorded at **low powers (to 10 kW)** were aperiodic what allows effective determination of $R_p(t)$ for the primer. Resistance of SI primers (Fig. 4) increased insignificantly after a long heating at $P \sim 1W$ (Fig. 2) to the moment of the resistant bridge breaking, and for $P \sim 1kW$ it increased steadily by $\sim 10\times$ within a few microseconds and without interferences (Fig. 4), what suggests that the bridge became then an overheated liquid at temperature of even a few thousand K.

In the case of SII primers (Fig. 8 and 11) the pulse $i(t)$ to the moment of activation consisted of a series of sub-pulses and at that time the R_p of the primer decreased and increased again what may be explained in the following way (Fig. 14).

For sufficiently high voltage (to ca. 300 V), **at the edge of capsule MP** (Fig. 14) through the contact points of crystals – components of MP – between the electrodes (casing and central contact) a breaking occurs along the shortest way to produce a current

chemicznych w najbliższym otoczeniu. Gazowe produkty tych reakcji o lokalnie wysokim ciśnieniu stają się słabo przewodzące, skutkiem czego prąd przez ten kanał przestaje płynąć, natomiast kolejne przebicie elektryczne następuje w jego sąsiedztwie, tworząc kanał DCh2 itd., aż do praktycznego zaniku prądu w spłonce. Odpowiada to impulsowi „(1)” na rys. 7, 8 i 9.

channel DCh1 which initiates chemical reactions within its nearest vicinity. The gaseous products of these reactions, with locally high pressure, become a bad-conductive medium and in effect the current ceases to flow through this channel, whereas a successive electric breaking takes place in its vicinity to create DCh2 channel, etc. until in practice the current stops to flow through the primer. It corresponds to pulse „(1)” in Fig. 7, 8 and 9.



Rys. 14. Schemat spłonki SII; DCh1 i DCh2 – pierwszy i następny prądowy kanał wyładowania, BW – propagacja fali reakcji chemicznych

Fig. 14. SII primer diagram; DCh1 and DCh2 – the first and the next current discharge channels, BW – chemical reaction wave propagation

Zainicjowana wydzielonym ciepłem Joule’a fala reakcji chemicznych, propagująca się w poprzek tabletki MP, staje się źródłem słabo przewodzących gazów o wysokim ciśnieniu. Ścięcie (zerwanie) membrany spłonki powoduje spadek ciśnienia tych gazów i wzrost ich przewodności elektrycznej, co pociąga za sobą powtórny przepływ prądu (impuls „(2)” na rys. 7 i 9, podobnie na rys. 10). **Impuls powtórny** rozładowuje nadmiar ładunku kondensatora, lecz **nie wnosi już energii do procesu pobudzenia spłonki**.

Przy wyładowaniach wysokonapięciowych (5 kV/ ~ 1 MW, punkty 3.1.3. i 3.2.3.) $u(t)$ i $i(t)$ miały charakter oscylacyjny o okresie $T \approx 380$ ns (rys. 6 i 13), co można wyrazić wzorem $i(t) = U_0 \chi \exp[-(R/2L)t] \sin(2\pi t/T)$, $\chi \leq 1$, gdzie L i R – indukcyjność i rezystancja całego obwodu, stałe w czasie trwania wyładowania. O ile, ze względu na odległe od spłonki umiejscowienie bocznika prądowego i dzielnika na-

A wave of chemical reactions triggered by Joule’s heat propagating across the MP capsule becomes a source of gases with low conductivity and high pressure. The breaking (shearing) of primer’s membrane declines the pressure of the gases and increases their electric conductivity what triggers a secondary flow of the current (pulse „(2)” in Figs. 7 and 9, and similarly in Fig. 10). **The secondary pulse** discharges an excessive charge on the condenser, but **does not contribute any energy into the process of primer initiation**.

For the high voltage discharges (5 kV/ ~ 1 MW, points 3.1.3. and 3.2.3.), signals of $u(t)$ and $i(t)$ had an oscillating character with period of $T \approx 380$ ns (Figs. 6 and 13), what may be expressed by $i(t) = U_0 \chi \exp[-(R/2L)t] \sin(2\pi t/T)$, $\chi \leq 1$, where L and R – inductivity and resistance of the whole circuit which are unchangeable during the discharging. Even because of a remote location of the current shunt and voltage divider from the primer, it was not possible to determine the

pięcia niemożliwe było wyznaczenie bieżącej wartości rezystancji spłonki, to mierząc $T = 2\pi(LC_0)^{1/2}$ i $I_n \cdot I_{n+1}$ - kolejne maxima przebiegu prądu, można wyznaczyć L i $R = (2L/T) \ln(I_{n+1}/I_n)$. Wartości R (~ 6 Ohm dla SI, ~ 3 Ohm dla SII $\pm 60\%$) i L (~ 3 μH $\pm 20\%$) zamieszczono w tabeli 2. Numeryczne całkowanie $\int R i^2(t) dt$ po zarejestrowanych przebiegach natężenia prądu dawało wartości energii pochłoniętej zbliżone w granicach błędów do E_0 („absorbed” energy, rys. 6).

Pojedynczy kanał prądowy przy $P \sim 1$ MW inicjowany był w spłonkach SI przez odparowanie metalicznego mostka (pochłonięcie ok. 7 mJ po 30-60 ns), w SII – przez przebicie napięciowe (wytworzenie kanału prądowego ze zjonizowanego MP), zlokalizowane prawdopodobnie przy brzegu tabletki MP. W dalszym ciągu po przebicciu, w spłonkach SI i SII zlokalizowany kanał prądowy o średnicy < 1 mm wypełniony był zjonizowaną plazmą aż do całkowitego rozładowania energii kondensatora po $2,5 \div 3,5$ μs . W SII, przy gęstości MP $\rho \approx 2500$ kgm^{-3} , przewodności cieplnej $\lambda \approx 0,4$ W/m/K, średnim cieple właściwym $c_p \approx 1$ kJ/kg/K [2] (z uwzględnieniem parowania ok. 2 kJ/kg/K) i przewodności elektrycznej ok. 3000 $\text{Ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$ [3] temperatura plazmy kanału o średnicy 50 μm i długości 3 mm po pochłonięciu energii ok. 150 mJ mogła wzrosnąć o $\Delta T(0,t) \approx 13000$ K przy rezystancji ok. 5 Ohm, bliskiej wartościom z tabeli 2.

Ciepło z kanału prądowego dyfundowało w otaczającą MP w kierunku r prostopadłym do jego osi. Opisując tę dyfuzję wzorami $\Delta T(r,t) \approx \Delta T(0,t) \cdot \exp(-r/s_\Theta)$, $s_\Theta = (\lambda t / \rho c_p)^{1/2}$ [4] otrzymujemy, że po czasie $3 \div 4$ μs kanał mógł nagrzać otaczającą MP w walcowej warstwie o grubości $r \approx 3$ μm do $\Delta T > 300$ K, a taki przyrost temperatury wystarcza do pobudzenia stosowanych zwykle materiałów inicjujących, jak TNRO lub PbN_6 . Ponieważ po tym czasie dopływ energii ustawał, należy przyjąć, że minimalne rozmiary ogniska pobudzenia są rzędu średnicy kanału wyładowania.

Wyładowanie wysokonapięciowe było

instant values of primer's resistance, it was still possible to determine L and $R = (2L/T) \ln(I_{n+1}/I_n)$ by measuring $T = 2\pi(LC_0)^{1/2}$ and $I_n \cdot I_{n+1}$ – successive maximal peaks of current. The values R (~ 6 Ohm for SI, ~ 3 Ohm for SII $\pm 60\%$) and L (~ 3 μH $\pm 20\%$) are presented in table 2. Numerical integration of $\int R i^2(t) dt$ along the recorded curves of current intensity gave the values which are similar, within limits of error, to E_0 („absorbed” energy, Fig. 6).

An individual current channel for $P \sim 1$ MW was initiated in primers SI by evaporation of the metallic bridge (absorption of ca. 7 mJ after 30-60 ns), and in primers SII – by voltage breakings (generation of a current channel from the ionised MP) likely localised at the edge of MP capsule. At the next moments after the breaking in primers SI and SII was localised the current channel of diameter < 1 mm filled with the ionised plasma until the complete discharging of the condenser after $2.5 \div 3.5$ μs . For SII at density of MP equal to $\rho \approx 2500$ kgm^{-3} , thermal conductivity $\lambda \approx 0.4$ W/m/K, average specific calorificity $c_p \approx 1$ kJ/kg/K [2] (by accounting the evaporation ca. 2 kJ/kg/K) and electric conductivity ca. 3000 $\text{Ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$ [3] the temperature of plasma within the channel of 50 μm diameter and length of 3 mm, after absorption of ca. 150 mJ energy, could build up to $\Delta T(0,t) \approx 13000$ K at resistance of ca. 5 Ohm what is close to the values given in table 2.

The heat from the current channel has diffused in directions perpendicular to its axis into surrounding MP. Describing this diffusion by $\Delta T(r,t) \approx \Delta T(0,t) \cdot \exp(-r/s_\Theta)$, $s_\Theta = (\lambda t / \rho c_p)^{1/2}$ [4] we can see that after $3 \div 4$ μs the channel was able to heat the cylindrical layer of surrounding MP with thickness of $r \approx 3$ μm to $\Delta T > 300$ K and such temperature growth is sufficient to initiate commonly used initiating materials such as TNRO or PbN_6 . As after this time the flow of energy was terminated then it has to be accepted that a minimal size of an initiating spot is of the order of discharging channel diameter.

źródłem zakłóceń elektrycznych nakładających się na wszystkie tory pomiarowe, widocznych na rys. 12 głównie w czasie pierwszych $8 \div 10 \mu\text{s}$, ale linię zerową toru przyspieszenia odchylających nawet po $70 \mu\text{s}$. Ustalenie „zerowej linii z wpływem zakłócenia” (jasnoniebieska na rys.12) wymagało każdorazowo wstępnej rejestracji przebiegu z toru $a(t)$ przy zwartych na końcach przewodach pomiaru i pobudzania spłonki.

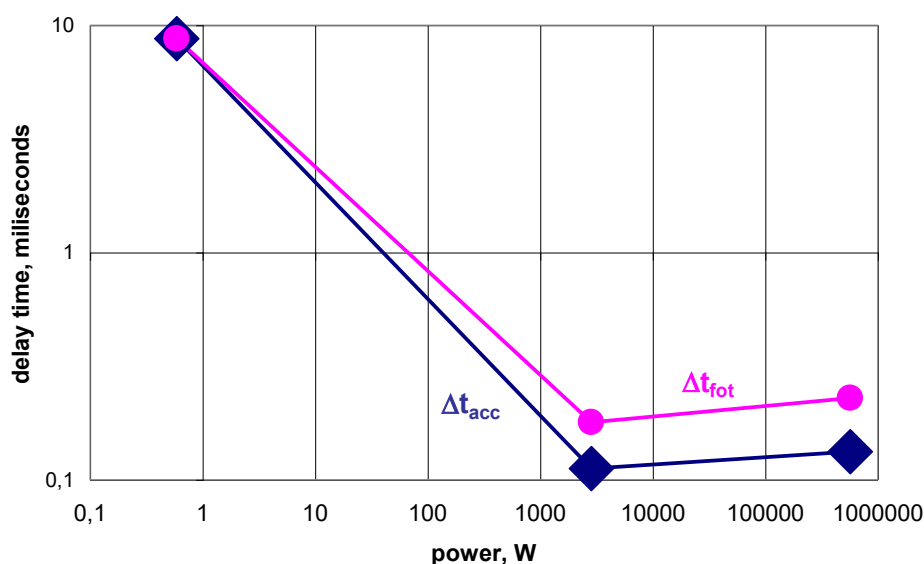
4.2. Opóźnienie zadziałania

Opóźnienie zadziałania w wypadku spłonek obu rodzajów maleje wraz ze wzrostem mocy impulsu pobudzenia, co obrazują rysunki 15 i 16, sporządzone na podstawie tabeli 2, Plateau funkcji $\Delta t = f(P)$ w zakresie $P \sim 1 \text{ kW} \div 1 \text{ MW}$ dotyczy spłonek obu rodzajów SI i SII, przy czym dla spłonek rodzaju SI jest ok. $3 \times$ wyższe ($\sim 150 \mu\text{s}$) niż dla rodzaju SII ($\sim 50 \mu\text{s}$) i sprowadza się prawdopodobnie do czasu przereagowania głównej części MP.

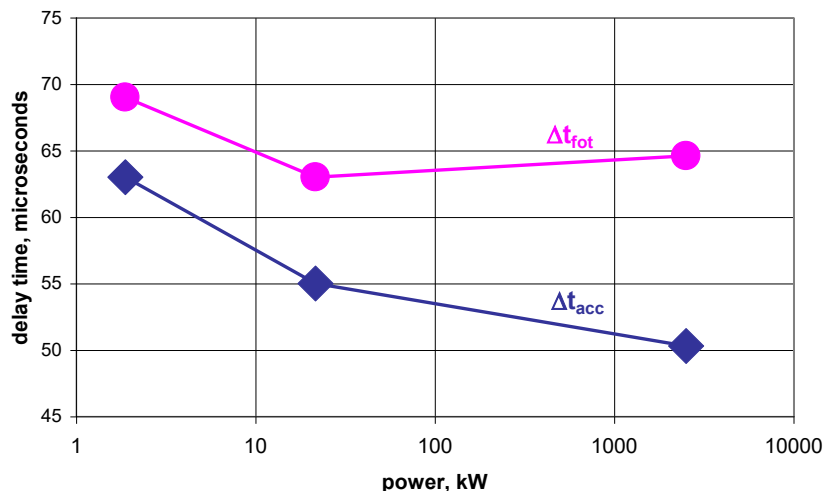
The high voltage discharge was a source of electric interferences affecting all measurement channels and visible in Fig. 12 not only during the first $8 \div 10 \mu\text{s}$ but even after $70 \mu\text{s}$ as a declination of the neutral line in the acceleration channel. The resetting of “neutral line affected by interference” (clear blue in Fig.12) has required for each time an initial recording of signal from $a(t)$ channel at short-circuited ends of primer’s measurement and initiation wires.

2.2. Delay of Activation

Activation delay for two types of primers decreases with the increase of the initiation pulse power, what is illustrated by Figs. 15 and 16 prepared on the basis of table 2. Plateau of function $\Delta t = f(P)$ for $P \sim 1 \text{ kW} \div 1 \text{ MW}$ concerns both types of SI and SII primers, but for SI primers it is ca. $3 \times$ greater ($\sim 150 \mu\text{s}$) than for SII type ($\sim 50 \mu\text{s}$) and is likely caused by the time needed for the reaction of the main part of the MP.



Rys. 15. Opóźnienie zadziałania spłonek rodzaju SI w funkcji mocy pobudzenia
Fig. 15. Delay time of SI primers as a function of initiation power



Rys. 16. Opóźnienie zadziałania spłonek rodzaju SII w funkcji mocy pobudzenia

Fig. 16. Delay time of SII primers as a function of initiation power

4.2.1. Błąd zwłoki sygnału drgań komory

Δt_{acc}

Fala dźwiękowa, generowana przez narastanie ciśnienia w korpusie spłonki/ zapłonika pokonywała do akcelerometru po korpusie komory wybuchowej drogę ok. 6 cm; przy prędkości dźwięku w stali, wynoszącej ok. 6 km/s [2] dało to wydłużenie rejestrowanej Δt_{acc} o $\Delta t_{pass} \approx 10 \mu s$.

Opóźnienie Δt_{acc} odpowiadało zauważalnemu odchyleniu krzywej $a(t)$ od poziomu zerowego, któremu przy stosowanym akcelerometrze odpowiadał przyrost o ok. 3 „g” $\approx 30 \text{ m/s}^2$. Przyjmując, że propagacyjne straty amplitudy sygnału wynosiły ok. 10× otrzymujemy, że przyspieszenie ścianek korpusu łuski w rejonie spłonki/ zapłonika wynosiło wówczas $\Delta a \approx 300 \text{ m/s}^2$. Zakładając, że ciśnienie Δp_0 , działając na powierzchnię $S \sim 0,5 \text{ cm}^2$ wnętrza spłonki, nadawało przyspieszenie Δa masie dna łuski m_D wynoszącej ok. 100 g dla kalibru 30 mm i ok. 40 g dla kalibru 20 mm, otrzymano progowe wartości $\Delta p_0 \approx m_D \times \Delta a / S$ wynoszące odpowiednio 6 bar dla kalibru 30 mm i 2,5 bar dla kalibru 20 mm.

4.2.2. Błąd zwłoki sygnału świetlnego Δt_{fot}

Świejące gazy po przereagowaniu przynajmniej większej części MP wydostawały

4.2.1. Delay Error for Chamber Vibrations Δt_{acc}

The acoustic wave generated by the building up pressure in the primer/ igniter casing travelled distance of ca. 6 cm through the walls of blasting chamber to the accelerometer what at velocity of sound in the steel equal to ca. 6 km/s [2] gave the elongation of Δt_{acc} by $\Delta t_{pass} \approx 10 \mu s$.

Delay of Δt_{acc} corresponded to a visible declination of curve $a(t)$ from the neutral level what for the used accelerometer was the equivalent of increase by ca. 3 „g” $\approx 30 \text{ m/s}^2$. Assuming that amplitude of signal was attenuated at propagation by ca. 10x we can see that the acceleration of the case wall near the primer/ igniter was equal then to $\Delta a \approx 300 \text{ m/s}^2$. Assuming that the pressure Δp_0 acting against the surface of $S \sim 0,5 \text{ cm}^2$ inside the primer provided acceleration Δa to the mass m_D of the primer base equal to ca. 100 g for calibre 30 mm and ca. 40 g for calibre 20 mm the border values may be received for $\Delta p_0 \approx m_D \times \Delta a / S$ as respectively equal to 6 bar for calibre 30 mm and 2.5 bar for calibre 20 mm.

4.2.2. Delay Error of Shinning Δt_{fot}

Shinning gases leave the inside of the igniter after at least a greater part of MP has re-

się z wnętrza zapłonika po ścięciu (zerwaniu) miedzianej membrany (rys. 14). Proces ścinania trwał Δt_{cut} . Założono, że ścinanie membrany rozpoczynało się na krawędziach otworu o średnicy d w warstwie o grubości $h > 2d$ po przekroczeniu wytrzymałości na ścinanie, która wynosi $R_T \approx 200$ MPa. Napędzanie wycinka membrany o masie $m_m = \pi d^2 \delta \rho$, $\rho = 8300$ kgm⁻³ [2] wzdłuż osi spłonki x odbywało się siłą, która od bardzo małej wartości dla $x = 0$ rosła w przybliżeniu liniowo do końcowej wartości $F_T = \pi d \delta R_T$ przy $x = \delta$, której odpowiadało przyspieszenie $a_T = F_T / m_m$ i ciśnienie w korpusie spłonki/zapłonika $p_T = F_T / (\pi d^2)$. Założono, że na odcinku $x \leq \delta$ wycinek membrany poruszał się z przyspieszeniem $a_T / 2$, na odcinku $\delta \leq x \leq \delta + h$ - z przyspieszeniem a_T . W przypadku SI $d \approx 6,2$ mm, $\delta \approx 0,3$ mm, $h \approx 0,7$ mm, w przypadku SII - odpowiednio 2,7 mm, 0,1 mm i 0,25 mm. Stąd całkowity czas napędzania wycinka membrany na odcinku $\delta + h$, od chwili osiągnięcia ciśnienia $p_T \approx 400$ bar dla SI i $p_T \approx 300$ bar dla SII do chwili otwarcia drogi światła do fotodiody, wyniósł $\Delta t_{\text{cut}} \approx 40$ μ s dla SI i $\Delta t_{\text{cut}} \approx 18$ μ s dla SII.

4.3. Interpretacja opóźnienia zadziałania

Z punktu widzenia możliwości inicjowania dalszych procesów ważna jest wartość Δt_{fot} , gdyż odpowiada ona otwarciu drogi ogniowej.

Ze względu na $\Delta p_0 \ll p_T$ można przyjąć, że w czasie $\Delta t_{\text{acc}} - \Delta t_{\text{pass}}$ tworzyło się samopodtrzymujące ognisko reakcji w MP, obejmujące obszar dużo mniejszy od całej zawartości MP spłonki/zapłonika. Zdecydowanie większa część MP przereagowywała w czasie $t_R \approx (\Delta t_{\text{fot}} - \Delta t_{\text{cut}}) - (\Delta t_{\text{acc}} - \Delta t_{\text{pass}})$. Ponieważ czas dostarczania energii pobudzenia (2,5 ÷ 3,5 μ s) jest najlepiej określony przy mocy ~ 1 MW można przyjąć (tabela 2), że $t_R \approx 70$ μ s dla SI, $t_R \approx 10$ μ s (przy niższych mocach $t_R \approx 0$ w granicach będu) dla SII. W tym ostatnim przypadku front reakcji przemieszczał się jak na rys. 14, co przy ok. 7 mm

acted and the brass membrane was broken (cut) (Fig. 14). Process of breaking lasted Δt_{cut} . It was assumed that a shear of the membrane originates at the edges of the hole with diameter d in a layer having the thickness of $h > 2d$ after the shearing strength equal to $R_T \approx 200$ MPa is crossed. Driving of membrane segment with mass $m_m = \pi d^2 \delta \rho$, $\rho = 8300$ kgm⁻³ [2] along the primer's axis x takes place due to a force which increases approximately in a linear way from insignificant level for $x = 0$ to the final value $F_T = \pi d \delta R_T$ for $x = \delta$, and which provides the acceleration $a_T = F_T / m_m$ and the pressure inside the body of the primer/igniter $p_T = F_T / (\pi d^2)$. It was assumed that on the distance of $x \leq \delta$ the segment of the membrane moved with the acceleration of $a_T / 2$, and on the distance of $\delta \leq x \leq \delta + h$ with the acceleration of a_T . In the case of SI, $d \approx 6.2$ mm, $\delta \approx 0.3$ mm, $h \approx 0.7$ mm, and for SII - respectively, 2.7 mm, 0.1 mm and 0.25 mm. Hence, the overall time to drive a membrane segment on distance of $\delta + h$, from the moment when the pressure is built up to $p_T \approx 400$ bar for SI, and $p_T \approx 300$ bar for SII, to the moment when a channel for light propagation to the photodiode is opened, is $\Delta t_{\text{cut}} \approx 40$ μ s for SI and $\Delta t_{\text{cut}} \approx 18$ μ s for SII.

4.3. Interpretation of Activation Delays

The value of Δt_{fot} is important for initiation of following processes as it is responsible for opening of a firing path.

Because of $\Delta p_0 \ll p_T$ it may be accepted that in time $\Delta t_{\text{acc}} - \Delta t_{\text{pass}}$ a self-sustaining centre of reaction inside MP has existed, and it contained a much smaller space than the overall volume of MP in the primer/igniter. Significantly greater part of MP has reacted during $t_R \approx (\Delta t_{\text{fot}} - \Delta t_{\text{cut}}) - (\Delta t_{\text{acc}} - \Delta t_{\text{pass}})$. As the time for delivering the initiation energy (2.5 ÷ 3.5 μ s) is identified in the best way for the power ~ 1 MW, then it may be taken (table 2) that $t_R \approx 70$ μ s for SI, $t_R \approx 10$ μ s (for lower powers $t_R \approx 0$ within the limits of error) for SII. In this last case the front of reaction has travelled as in Fig. 14, what suggest that, at ca. 7 mm

średnicy tabletki MP sugeruje średnią liniową prędkość reakcji $\sim 1 \text{ mm}/\mu\text{s}$. Biorąc pod uwagę, że 40% MP w SII stanowiło TNRO [1], którego prędkość detonacji wynosi $1,6 \text{ mm}/\mu\text{s}$ [5] można przypuszczać, że w końcowej fazie reakcja w spłonkach SII mogła przechodzić w detonację. W przypadku SI posiadającej bardziej skomplikowaną geometrię, w której spłonka ze swoją MP oddzielona jest przez łącznik z innej MP z zapłonikiem z jeszcze innej MP, tego rodzaju szacowania są nieuprawnione.

4.4. Energia pochłonięta

Średnia energia pochłonięta do chwili zadziałania traktowanej jako $\min(\Delta t_{\text{acc}}, \Delta t_{\text{fot}})$ wynosiła w przypadku SI i przy mocach $\sim 1 \div 1000 \text{ W}$ $E_p = 5,5$ i $7,1 \text{ mJ}$, natomiast w przypadku SII i mocy $\sim 1 \text{ kW}$ - $E_p = 15,3 \text{ mJ}$, co jest wartością podobnego rzędu, jak wyznaczona w [1] ($1,5 \div 11,7 \text{ mJ}$). Przy mocach $\sim 10 \text{ kW}$ w przypadku SII oraz $\sim 1 \text{ MW}$ przy SI i SII wartości E_p powinny być podobne, ale dostarczenie energii wystarczającej do pobudzenia następowało dużo wcześniej niż prze-reagowanie głównej części MP i ścięcie membrany bądź zadziałanie akcelerometru; stąd w przypadku SII/ 10 kW średnie $E_p = 63 \text{ mJ}$, zaś w przypadku SI i SII i 1 MW – przyjęcie jako E_p energii dysponowanej kondensatora – odpowiednio ok. 20 i 200 mJ (tabela 1).

5. Podsumowanie

Wyznaczono opóźnienia zadziałania spłonek dwu rodzajów i pokazano, że malały od rzędu milisekund do rzędu $100 \mu\text{s}$ i poniżej wraz ze wzrostem mocy pobudzenia od $\sim 1 \text{ W}$ do $\sim 1 \text{ MW}$; w przypadku spłonek SII (Vulcan) stwierdzono, że w warunkach eksploatacyjnych ($P_{\text{max}} = 1 \div 10 \text{ kW}$), przy częstotliwości strzałów ok. 6000 1/min okres między strzałami, wynoszący ok. 10 ms , jest istotnie większy od zmierzonej wartości opóźnienia zadziałania, wynoszącej poniżej $100 \mu\text{s}$.

Wyznaczono energię potrzebną do pobudzenia spłonki/ zapłonika obu rodzajów –

diameter of MP capsule, the average linear rate of reaction is $\sim 1 \text{ mm}/\mu\text{s}$. Considering that 40% of MP in SII comprised TNRO [1] with the velocity of detonation $1.6 \text{ mm}/\mu\text{s}$ [5] it may be expected that the reaction in primers SII at final phase can change into detonation. In the case of SI with a more complex geometry, where the primer with its own MP is separated through a linking member, made of other MP, from the igniter made of yet another MP, such estimations are unsubstantial.

4.4. Absorbed Energy

The average energy absorbed to the activation defined as $\min(\Delta t_{\text{acc}}, \Delta t_{\text{fot}})$ was $E_p = 5.5$ and 7.1 mJ in case of SI and for powers $\sim 1 \div 1000 \text{ W}$, and $E_p = 15.3 \text{ mJ}$ in case of SII and power $\sim 1 \text{ kW}$ what is a similar value to that determined in [1] ($1.5 \div 11.7 \text{ mJ}$). For powers of $\sim 10 \text{ kW}$ in case of SII, and of $\sim 1 \text{ MW}$ for SI and SII the values E_p shall be similar, but the energy required for the initiation was delivered much earlier than the reaction of main portion of the MP and the breaking of the membrane or activation of the accelerometer, and therefore in case of SII/ 10 kW the average $E_p = 63 \text{ mJ}$, whereas in case of SI and SII and 1 MW the disposable energy of condenser may stand for E_p – respectively ca. 20 and 200 mJ (table 1).

5. Summary

The delays in activation for two types of primers were determined to show that they declined from the order of millisecond to the order of $100 \mu\text{s}$ and below with the power of initiation increasing from $\sim 1 \text{ W}$ to $\sim 1 \text{ MW}$; in case of primers SII (Vulcan) it was stated, that at service conditions ($P_{\text{max}} = 1 \div 10 \text{ kW}$) for the rate of fire ca. 6000 1/min , the pause between the shots equal to ca. 10 ms is significantly greater than the measured delay of activation equalling below $100 \mu\text{s}$.

The energy needed for initiation of primer/ igniter of two types was determined on the

wyniosła ona od kilku do kilkunastu mJ.

Oszacowano końcowe ciśnienia w korpusach spłonek/ zapłonników, wynoszące 300 – 400 bar.

Pokazano skokowy – z subimpulsami – rozwój wyładowania prądowego w przypadku pobudzania spłonek z rezystancją rozłożoną w mieszaninie pirotechnicznej.

Oszacowano czasy przereagowania mieszaniny pirotechnicznej i wskazano na możliwość przechodzenia w detonację w końcowej fazie reakcji chemicznych w spłonkach z rezystancją rozłożoną.

level from a few to a dozen of mJ.

Terminal pressure inside the capsules of primers/ igniters was estimated on the level of 300 – 400 bar.

A jumping character – with sub-pulses – of current discharge was shown for initiation of primers with the resistance distributed throughout the pyrotechnic mixture.

Times needed for completing the reaction of pyrotechnic mixture were estimated and it was shown that at the terminal phase the chemical reaction may change into a detonation for the primers with distributed resistance.

Literatura / Literature

- [1] L.J. Bement, C. Holmes, J. McGrory, M.L. Schimmel, An Investigation to Improve Quality Evaluations of Primers and Propellant for 20mm Munitions, *Munitions Technology Symposium IV*, Reno, Nevada, 10-12.02.1997.
- [2] Tablice fizyczno-astronomiczne, pod red. W. Mizerskiego, wyd. Adamantan, Warszawa 2002.
- [3] „Razryadno – impulsnaya technologia”, praca zbiorowa, red. G.A.Gulyi, wyd. Naukova Dumka, Kiyev, 1978.
- [4] Andrzej Faryński, Andrzej Długołęcki, Jarosław Dębiński, Łukasz Słonkiewicz, Determination of the Firing Pin Critical Velocity and the Critical Power in the Percussive Initiation of Primer Caps, *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, 7, 4(26), 2016.
- [5] B.A. Epov, „Osnovy vzryvnogo dela”, Voenn. Izdat. Min. Oborony SSSR, Moskva 1974.

