



## KONCEPCJA MAGNETOHYDRODYNAMICZNEGO ZAPŁONNIKA PLAZMOWEGO DO INICJOWANIA ZAPŁONU MAŁOWRAŻLIWYCH MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH

### *CONCEPT OF MAGNETO-HYDRODYNAMIC PLASMA IGNITER FOR IGNITION OF LOW VULNERABILITY GUN PROPELLANTS*

Cezary POCHRYBNIAK, Andrzej HORODEŃSKI, Kamil NAMYŚLAK

Narodowe Centrum Badań Jądrowych  
*National Nuclear Research Centre*

Zbigniew LECIEJEWSKI, Zbigniew SURMA, Jakub MICHALSKI

Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna  
*Faculty of Mechatronics and Aerospace at the Military University of Technology*

DOI 10.5604/01.3001.0010.6150

**Streszczenie:** Przedmiotem pracy jest koncepcja oraz wstępna weryfikacja eksperymentalna koaksjalnego, plazmowego magnetohydrodynamicznego zapłonika mało wrażliwych materiałów miotających. Koncepcja jest interesującą alternatywą dla zapłonników, w których plazma wytwarzana jest metodą eksplodującego drutu w generatorach plazmy typu CPG (Capillary Plasma Generator), będących przedmiotem badań wielu laboratoriów na całym świecie.

**Słowa kluczowe:** plazma, MHD, zapłonnik koaksjalny, zapłonnik GPC, mało wrażliwe materiały miotające

### 1. Wstęp

Zastosowanie zapłonika plazmowego do inicjacji spalania mało wrażliwego materiału miotającego poprzez szybki wzrost temperatury medium otaczającego powierzchnię ziaren materiału miotającego do poziomu dziesiątek tysięcy kelwinów jest sposobem na radykalną poprawę bezpieczeństwa użytkowania amunicji. W przeciwieństwie do klasycznego zapłonu czarnoprowchowego, plazma umożliwia bardzo szybkie (poniżej 1 ms) osiągnięcie jednorodnego zapłonu na całej powierzchni ziaren prochowych oraz zmniejszenie rozrzutu prędkości początkowej pocisku, zaś możliwość precyzyjnego dozowania

**Abstract:** A concept of plasma coaxial magneto-hydrodynamic igniter for low vulnerability gun propellants and initial experimental results are presented in this paper. The concept is an interesting alternative for igniters generating the plasma by a blasting wire such as CPG (Capillary Plasma Generator) systems which have been recently investigated in many worldwide laboratories.

**Keywords:** plasma, MHD, coaxial igniter, CPG igniter, low vulnerability gun propellants

### 1. Introduction

Application of plasma igniter for initiating the process of combustion of low vulnerability gun propellants by a rapid temperature increase of a media surrounding propellant grains to the levels of a few dozen thousand Kelvin degrees may radically improve the safety of ammunition use. Contrary to conventional black powder igniters the plasma provides a rapid (below 1 ms) and uniform ignition for the whole surface of gun propellant grains what reduces the spread of projectile muzzle velocities and even can

energii do generatora plazmy pozwala pośrednio na sterowanie prędkością początkową pocisków.

W znanych do tej pory rozwiązaniach plazma generowana jest poprzez rozładowanie baterii impulsowych kondensatorów wysokonapięciowych przez cienki drucik miedziany – jest to rozwiązanie znane w literaturze jako „eksplodujący drut” (*exploding wire - EW*). [1,2,3,5] Duża energia rozładowania (kilka - kilkadziesiąt kJ) powoduje odparowanie i rozgrzanie par miedzi do wysokich temperatur (rzędu kilkunastu-kilkudziesięciu tysięcy Kelwinów). Wytworzona w ten sposób gorąca plazma dyfunduje m.in. w stronę materiału wybuchowego inicjując jego zapłon.

Podstawową cechą zapalnika MHD jest magneto-hydrodynamiczny mechanizm wypływu gorącej plazmy z generatora plazmy do komory spalania. W przypadku EW jest to głównie słabo ukierunkowany mechanizm dyfuzyjno-konwekcyjny, podczas gdy w rozwiązaniu MHD przepływy cieplne są bardzo silnie wspomagane przez ciśnienie magneto-hydrodynamiczne, które dosłownie „wymiatą” plazmę z obszaru wylądowania w stronę czoła zapalnika. W rozwiązaniu tym można więc oczekiwać większej wydajności i szybkości procesu zapłonu miotającego materiału wybuchowego, większej pewności działania oraz zmniejszonego zapotrzebowania na energię, a w efekcie mniejszych wymiarów jednostki zasilającej.

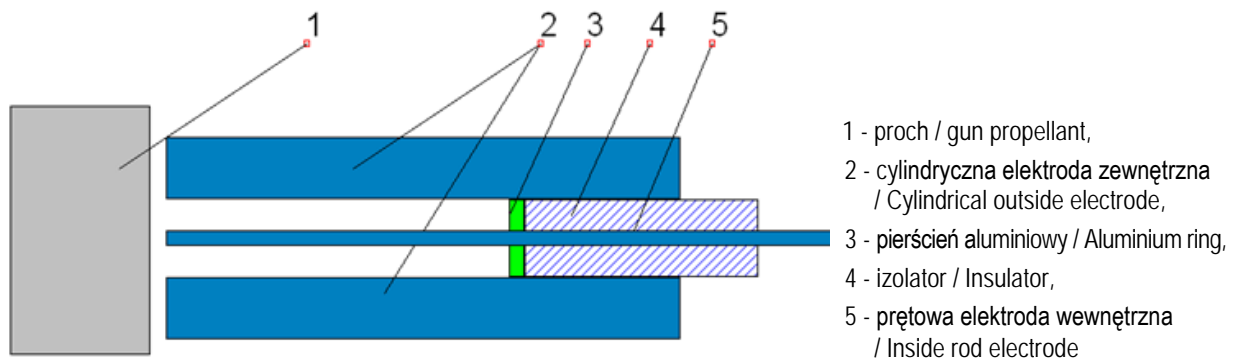
Możliwe są co najmniej dwa podstawowe typy konfiguracji zapalnika: koaksjalny i liniowy.

make the velocities be controlled by a precise adjusting of energy supplied to the plasma generator.

In existing solutions, the plasma is generated by a discharge of high voltage pulse capacitors through a thin copper wire what is described in publications as *exploding wire - EW* [1,2,3,5]. The high energy of the discharge (up to dozens of kJ) makes the copper vaporise and its vapours get high temperature (up to a few dozen of Kelvin degrees). The hot plasma produced in such a way diffuses also into the gun propellant and initiates its ignition.

A magneto-hydrodynamic mechanism of hot plasma outflow from the generator into a combustion chamber is basic feature of the MHD igniter. In the case of EW systems it is mainly a diffusion-convective mechanism of low directional properties whereas in the MHD systems the heat fluxes are significantly boosted by magneto-hydrodynamic pressure which literally “sweeps out” the plasma from the discharging zone towards the head of igniter. For this reason the solution may offer a greater reliability and efficiency and rate of ignition of gun propellant at reduced demand for energy and a lower size of supplying unit.

At least two basic configurations of the igniter are possible: coaxial and linear.



**Rys. 1. Schemat ideowy plazmowego zapalnika MHD**

*Fig. 1. Conceptual scheme of MHD plasma igniter*

W wersji koaksjalnej (rys. 1) generator plazmy składa się z rurowego pojemnika (2), wewnątrz którego na części jego długości umieszczono ściśle dopasowany do pojemnika izolator (4), w osi którego umieszczono metalowy pręt (5). Pojemnik (2) i pręt (5) stanowią elektrody generatora (polaryzacja dowolna). Przed przyłożeniem impulsu prądowego między elektrody wkłada się (ale nie przymocowuje w sposób trwały) pierścień z cienkiej folii metalicznej (3), np. Al, zwierający główny obwód elektryczny systemu. Przepływający impuls prądowy niesie dostatecznie wielką energię oraz moc, by folia metaliczna uległa szybkiemu stopieniu, odparowaniu, a następnie jonizacji i podgrzaniu do wysokiej temperatury (rzędu kilkunastu-kilkudziesięciu tysięcy Kelwinów). Płynący przez folię (3) (a następnie przez jej zjonizowane pary) oraz przez elektrodę zewnętrzną (2), oraz pręt wewnętrzny (5) prąd wytwarza azymutalne pole magnetyczne o indukcji  $B$ , które oddziałuje na folię (a w późniejszej fazie na plazmę) z siłą określoną prawem Biot-Savarta. W efekcie plazma jest wyrzucana przed czoło zapłonika inicjując zapłon materiału miotającego (1) umieszczonego przed czołem zapłonika. W układzie tym ogólne równanie przepływu plazmy wzdłuż osi układu ma postać [4]:

In the coaxial version (Fig. 1) the plasma generator consists of a cylindrical container (2) with a tightly fitted insulator placed inside a part of it (4) and a metal rod (5) fixed axially. Container (2) and the rod (5) are the electrodes of generator (each polarity is possible). Before the current pulse is applied, a thin metallic foil ring (3) is put in between the electrodes (without permanent fastening) to short the main electric circuit of the system. The flowing pulse of electric current has sufficient energy and power to make metallic foil melt and next ionize and get heated to high temperature (level of a dozen or a few dozen thousand Kelvin degrees). The current passing through the foil (3) (and next through its ionized vapours) and external electrode (2) and internal rod (5) generates an azimuthally field of magnetic induction  $B$  acting against the foil (and in the later phase to the plasma) with the force defined by the Biot-Savart's law. In effect the plasma is ejected in front of the igniter's head and initiates the ignition of gun propellant (1) placed before the igniter's head. In this configuration the general expression of plasma flow along the axis of the system has a form [4]:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla \left( p + \frac{B^2}{8\pi\mu_0} \right)$$

## 2. Mechanizm akceleracji

Umieszczone tuż przy izolatorze ruchome medium przewodzące – folia metaliczna, np. Al - podlega działaniu siły Lorentza działającej wzdłuż osi symetrii 'z':

## 2. Mechanism of Acceleration

The Lorentz force acts along the axis of symmetry 'z' against a conducting moving medium adjacent to isolator – metallic foil, e.g. Al:

$$dF = di dr B$$

Wywołane przepływem prądu azymutalne pole magnetyczne jest funkcją promienia:

The azimuth magnetic field generated by the flow of current depends on the radius:

$$B = \mu_0 i / (2\pi r)$$

gdzie:  $a < r < b$ , gdzie:  $a, b$  – promień we-

where:  $a < r < b$ , and:  $a, b$  – radius of in-

wewnętrznej i zewnętrznej elektrody

ternal and external electrode

Elementarny prąd:

Elementary current:

$$d\mathbf{i} = i r d\theta / (2\pi r)$$

gdzie:  $\theta$  - kąt azymutu w płaszczyźnie prostopadłej do osi z.

where:  $\theta$  - azimuth angle in the plane perpendicular to axis z.

Na podstawie powyższych zależności otrzymujemy:

On the basis of above relations we can get:

$$dF = \mu_0 / (4\pi^2 r) i^2 dr d\theta$$

Korzystając z prawa dynamiki Newtona:

By using the Newton's law of dynamics:

$$dF = dm dv/dt$$

gdzie:  $m$  – masa ruchomego medium przewodzącego prąd,  $v$  – prędkość.

where:  $m$  – mass of current conducting moving medium,  $v$  – velocity.

Biorąc pod uwagę, że w układzie cylindrycznym:

And considering that in the cylindrical system:

$$dm = \rho r d\theta dr \delta$$

gdzie:  $\delta$  – grubość folii,  $\rho$  – masa właściwa folii metalicznej (Al),

where:  $\delta$  – thickness of the foil,  $\rho$  – specific mass of a metallic foil (Al),

otrzymujemy wzór na przyspieszenie medium przewodzącego prąd:

we can describe the acceleration of a current conducting medium by:

$$dv/dt = \mu_0 / (4\pi^2 r^2 \rho \delta) i^2$$

oraz prędkość:

and the velocity:

$$v = \mu_0 / (4\pi^2 r^2 \rho \delta) \int i^2 dt$$

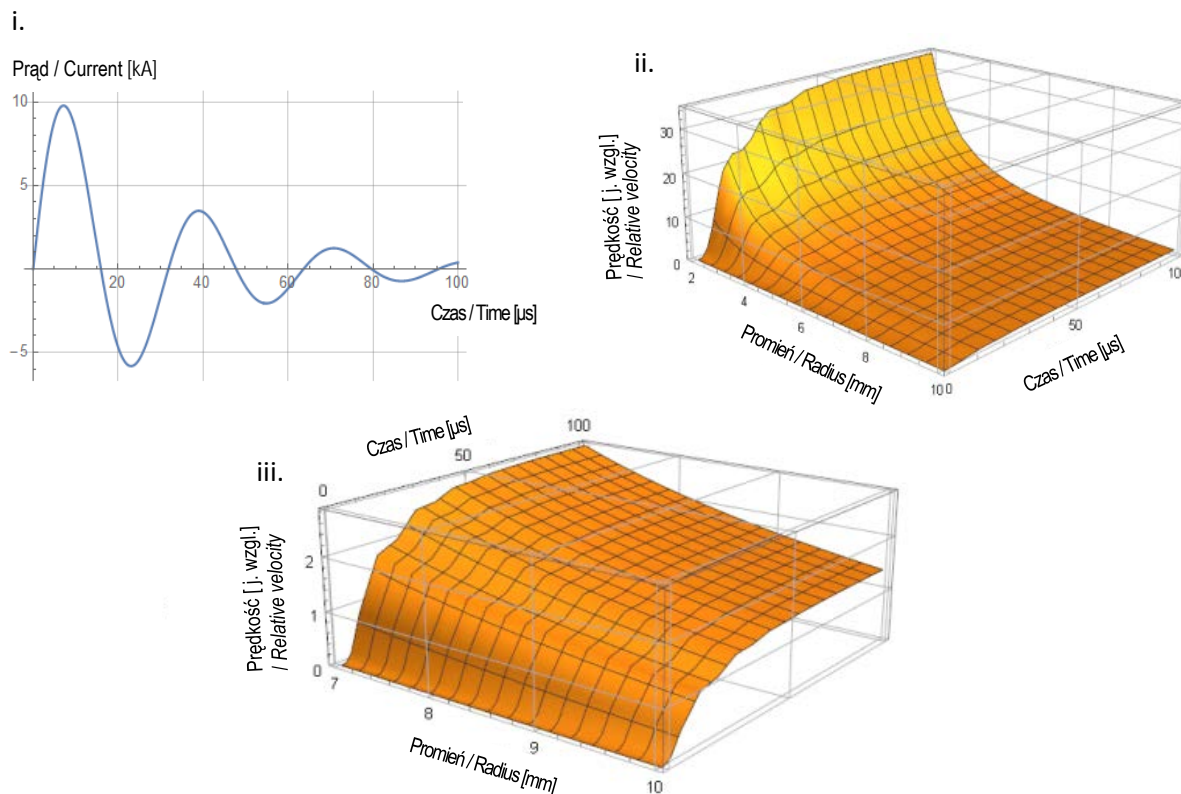
Kształt impulsu prądu ma postać:

The current pulse has a shape:

$$i(t) = I_0 \exp(-\alpha t) \sin(\omega t)$$

W oparciu o powyższe formuły wykonano obliczenia, których wynik przedstawiono na rys. 2.

The above formulae were used to calculate results presented in Fig. 2.



**Rys. 2. Przebieg prądowy (i.) oraz czasowe rozkłady prędkości medium przewodzącego w początkowej fazie procesu, gdy promień wewnętrzny jest znacznie mniejszy od zewnętrznego (ii.,  $b/a=10/2$ ) i gdy oba promienie są zbliżone (iii.,  $b/a = 10/7$ ). (Parametry układu zasilania:  $C = 50 \mu\text{F}$ ,  $U = 5 \text{ kV}$ ,  $L = 2 \mu\text{H}$ )**

**Fig. 2. The changes of current (i.) and velocities of conducting medium at the initial phase of the process when the internal radius is significantly smaller than the external one (ii.,  $b/a=10/2$ ), and when both radii are similar (iii.,  $b/a = 10/7$ ). (Parameters of supplying unit:  $C = 50 \mu\text{F}$ ,  $U = 5.0 \text{ kV}$ ,  $L = 2.0 \mu\text{H}$ )**

Jak widać na rysunku 2, w układzie koak-sjalnym siła akceleracji zależy od współrzędnej radialnej. Gdy promień elektrody zewnętrznej jest dużo większy od promienia elektrody wewnętrznej, pola przyspieszające są skupione w pobliżu wewnętrznego pręta, przy czym ta nierównomierność maleje gdy stosunek obu promieni zbliża się do jedności. Efekt ten można wykorzystać np. do uzyskania odpowiedniego poziomu ablacji z wewnętrznego pręta, co może mieć korzystny wpływ na działanie urządzenia.

Podobnie silną zależność od położenia radialnego wykazuje również proces przekazywania energii do rozgrzewanego elementu, który można oszacować poprzez obliczenie rozkładu temperatury folii wzdłuż promienia:

According to Fig. 2, the force of acceleration depends on the radial co-ordinate in the coaxial system. When the radius of external electrode is significantly greater than the radius of internal electrode then the accelerating fields are concentrated in the vicinity of the internal rod whilst the mentioned unbalance decreases when the ratio of the two radii approaches to one. This effect may be used e.g. to get a specific level of ablation from the internal rod what may be beneficial for the system's operation.

The process of transferring the energy into the heated component also depends strongly on radial position and it may be estimated by calculation of foil temperature distribution along the radius:

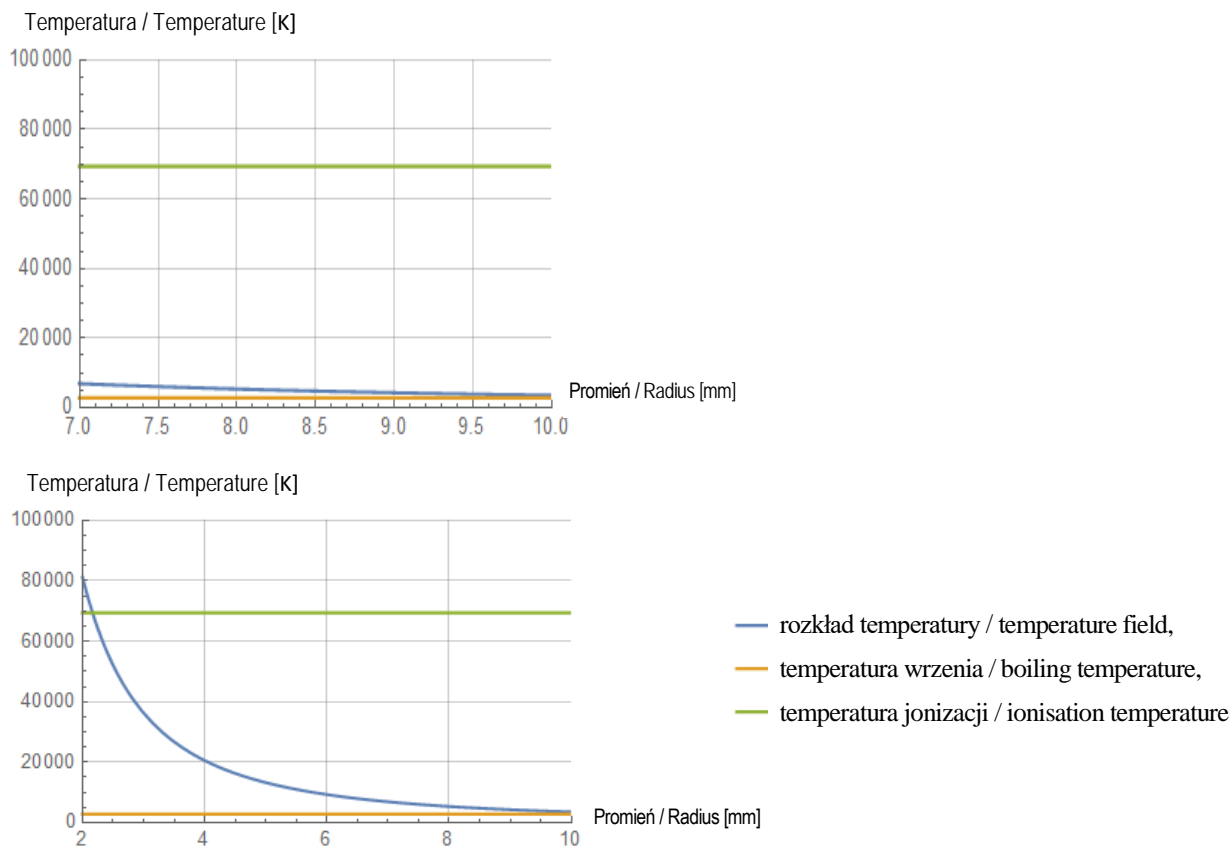
$$\Delta T(r) = \frac{1}{4\pi r^2 \delta^2 \sigma \rho \gamma} \int_0^\infty i[\tau]^2 d\tau$$

gdzie:  $\delta$  – grubość folii,  $\rho$  – masa właściwa folii,  $\sigma$  – elektryczna przewodność właściwa,  $\gamma$  – pojemność cieplna.

Rozkłady temperatury, obliczone według powyższego wzoru, przedstawiono na rys. 3.

where:  $\delta$  – foil thickness,  $\rho$  – foil specific mass,  $\sigma$  – electric specific conductivity,  $\gamma$  – thermal capacity.

Fig. 3 shows fields of temperature calculated from the above formula.



**Rys. 3. Temperatura folii Al wzdłuż promienia przy  $b/a=10/7$  (wykres górny) oraz przy  $b/a=10/2$  (wykres dolny)**

**Fig. 3. Temperature of Al foil along the radius at  $b/a=10/7$  (upper graph) and at  $b/a=10/2$  (bottom graph)**

Jak widać na rys. 3, jeżeli stosunek promienia zewnętrznej elektrody do wewnętrznej jest wysoki, depozycja energii skupia się w pobliżu elektrody wewnętrznej pozwalając osiągnąć bardzo wysoką temperaturę. W przeciwnym wypadku proces grzania jest znacznie mniej skuteczny.

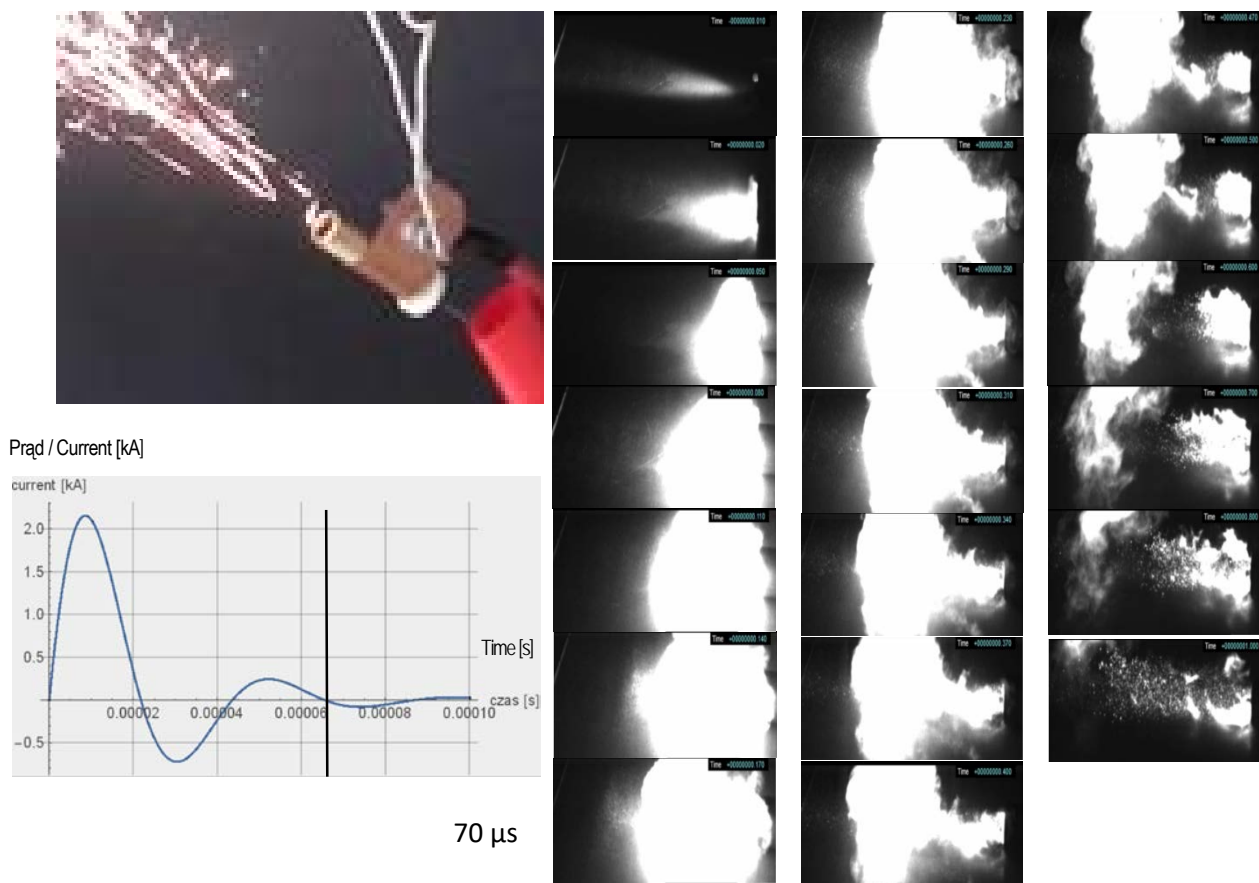
Zaprezentowane powyżej obliczenia temperatury wkładki metalicznej wykazują, że mechanizm generowania w urządzeniu plazmy nie jest termiczny (temperatura nie osiąga poziomu

It is visible in Fig. 3 that for the high ratio between the radii of external and internal electrodes the energy is concentrated near the internal electrode and in effect very high temperature may be produced. In the opposite case the heating process is much less effective.

Calculations of temperature for a metallic insert indicate that the plasma is not generated by a thermal mechanism (the temperature is below the level of efficient thermal

niezbędnego do wydajnej jonizacji termicznej), lecz powstaje skutek iskrzeń na stykach wkładki z elektrodami, by szybko przybrać postać łuku między elektrodami zapłonika, przesuwanego w kierunku czoła urządzenia siłą magnetohydrodynamiczną.

ionisation) but it is produced in effect of sparking on the contact points between the insert and the electrodes, becoming rapidly an arc between the igniter's electrodes that moves towards the head of the unit by the magneto-hydrodynamic force.

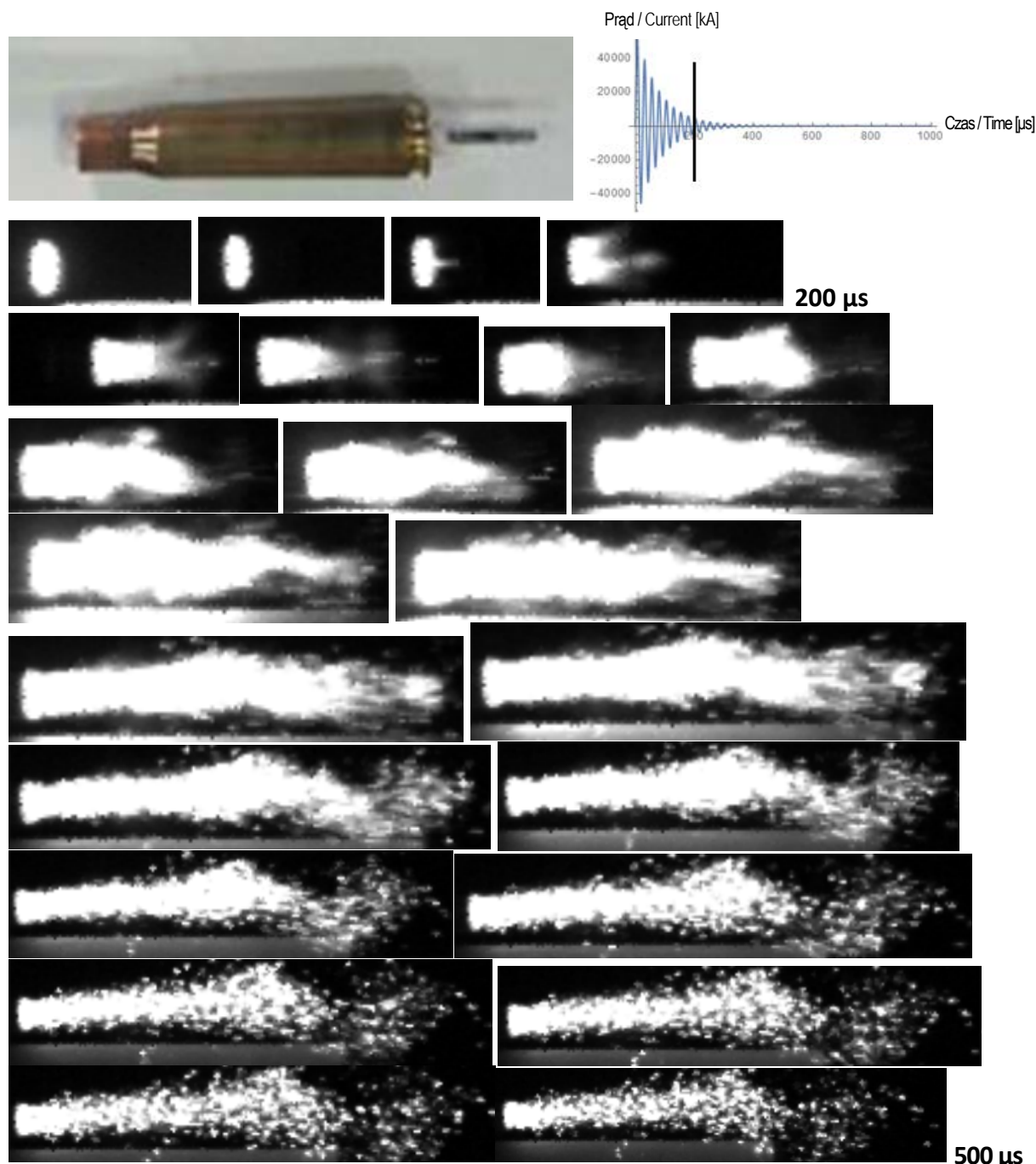


**Fot. 1. Z lewej – widok zapalnika i przebieg prądowy, z prawej - rozwój wyladowania (czas ekspozycji 10  $\mu$ s)**

*Photo 1. On the left – a view of the igniter and a plot of current, on the right – process of discharging (exposition time 10  $\mu$ s)*

Fakt ten uzasadnia sprawdzenie koncepcji zapłonika w takim samym układzie koaksjalnym, w którym wyladowanie plazmowe jest inicjowane powierzchniowym przebiciem między elektrodami urządzenia. W tym celu wystarczy zmodyfikować konstrukcję w ten sposób, by przy kolektorze zapłonika odległość między biegunami była na tyle mała, by umożliwić przebicie elektryczne nawet przy niezbyt wysokim (rzędu kilku kV) napięciu ładowania baterii zasilającej.

This fact substantiates a need for checking the concept of the igniter in the same coaxial configuration where the plasma discharge is initiated by a short circuit between the surfaces of electrodes. For this reason the design can be modified to get a gap between the poles near the igniter's collector small enough for a spark jump even at relatively low loading voltages (a few kV) of supplying battery.



Fot. 2. U góry – widok zapłonika (na tle łuski naboju karabinowego) i przebieg prądowy, niżej - rozwój wyładowania (czas ekspozycji 25  $\mu$ s)

Photo 2. On the top – a view of the igniter (and a rifle cartridge case) and a plot of current, below – process of discharging (exposition time 25  $\mu$ s)

### 3. Wstępne pomiary

#### Miniaturowy zapalnik koaksjalny

Elektroda zewnętrzna ma postać rurki o średnicy wewnętrznej 2 mm, średnicy zewnętrznej 9 mm i długości 40 mm. Jest zasilana z baterii o pojemności 50  $\mu$ F ładowanej

### 3. Initial Measurements

#### Miniaturised Coaxial Igniter

External electrode is made of a tube with internal diameter of 2 mm and external diameter of 9 mm and length of 40 mm. It is powered by a battery with 50  $\mu$ F



do napięcia 2 kV.

Jak widać na fot. 1, plazma pojawia się przed czołem zapłonika po ok. 30  $\mu$ s od początku wyładowania, co pozwala oszacować szybkość jej przemieszczania się wewnątrz działa na ok.  $10^3$  m/s. Wyptyw plazmy trwa ok 150  $\mu$ s, w końcowej fazie zapłonnik opuszczają już tylko rozgrzane cząstki materiału niezjonizowanego. Przepływ prądu kończy się po ok. 100  $\mu$ s, dalej trwa już tylko ekspansja termiczna.

### „Łuska”

Zapłonnik skonstruowany jest na bazie autentycznej łuski naboju. Jego parametry: średnica wewnętrzna 3 mm, średnica zewnętrzna 30 mm, długość 45 mm, zasilanie z baterii 12,5  $\mu$ F ładowanej do napięcia 18 kV. Jak widać na fot. 2, plazma pojawia się przed czołem zapłonika po ok. 100  $\mu$ s od początku wyładowania, co pozwala oszacować szybkość jej przemieszczania się wewnątrz działa na ok.  $3 \cdot 10^3$  m/s. Wyptyw plazmy trwa ok. 150  $\mu$ s, w końcowej fazie zapłonnik opuszczają już tylko rozgrzane cząstki materiału niezjonizowanego.

### Zapłonnik z azurową elektrodą zewnętrzną

W przeciwieństwie do wyżej wymienionych struktur, elektroda zewnętrzna ma postać wieńca prętów. W takiej konfiguracji elektroda ta staje się półprzezroczysta dla plazmy umożliwiając jej wyptyw nie tylko wzdłuż osi lecz również radialnie na zewnątrz układu elektrod. Parametry: średnica wewnętrzna 3 mm, średnica zewnętrzna 30 mm, długość 450 mm, zasilana z baterii 12,5  $\mu$ F ładowanej do napięcia 18 kV.

Jak widać na fot. 3, przez ok. 250  $\mu$ s plazma dryfuje wzdłuż osi układu z prędkością ok.  $2 \cdot 10^3$  m/s, jednocześnie „wylewając się” na zewnątrz układu. W późniejszej fazie, po zaniku prądu w obwodzie, ekspansja plazmy ma już charakter czysto dyfuzyjny.

Interesujący wynik daje fotografia o czasie ekspozycji wydłużonym o 3 rzędy wielkości - do 30 ms (zob. fot. 4). Przy tak długiej ekspozycji kamera rejestruje znacznie więcej światła, co pozwala zarejestrować znacznie większy obszar powietrza pobudzonego przez plazmę (nierejestrowalny przy za-

capacity loaded to 2 kV.

Photo 1 shows that the plasma appears in front of the igniter within ca. 30  $\mu$ s after the start of discharging what gives an estimated velocity of its expansion inside the gun of ca.  $10^3$  m/s. The outflow of the plasma lasts for ca. 150  $\mu$ s and in the final phase only some hot particles of unionised material leave the igniter. The flow of the current is terminated after ca. 100  $\mu$ s and only thermal expansion is continued.

### „Case”

The igniter is built on the base of an original cartridge case. It has following characteristics: internal diameter 3 mm, external diameter 30 mm, length 45 mm, powering by 12,5  $\mu$ F battery loaded to 18 kV. Photo 2 shows that the plasma appears in front of the igniter within ca. 100  $\mu$ s after the start of discharging what gives an estimated velocity of its expansion inside the gun of ca.  $3 \cdot 10^3$  m/s. The outflow of the plasma lasts for ca. 150  $\mu$ s and in the final phase only some hot particles of unionised material leave the igniter.

### Igniter with Perforated External Electrode

Contrary to the above structures the external electrode is a cylinder made of wires. In such configuration the electrode is quasi-transparent for plasma that flows not only along the axis but also in radial directions outside the system of electrodes. It has following characteristics: internal diameter 3 mm, external diameter 30 mm, length 450 mm, powered by a battery of 12,5  $\mu$ F loaded to 18 kV.

Photo 3 shows that the plasma has been drifting for ca. 250  $\mu$ s along the unit axis with the velocity of ca.  $2 \cdot 10^3$  m/s and “pouring outside” the system in the same time. Later when the current expires the plasma expansion has exclusively diffusive character.

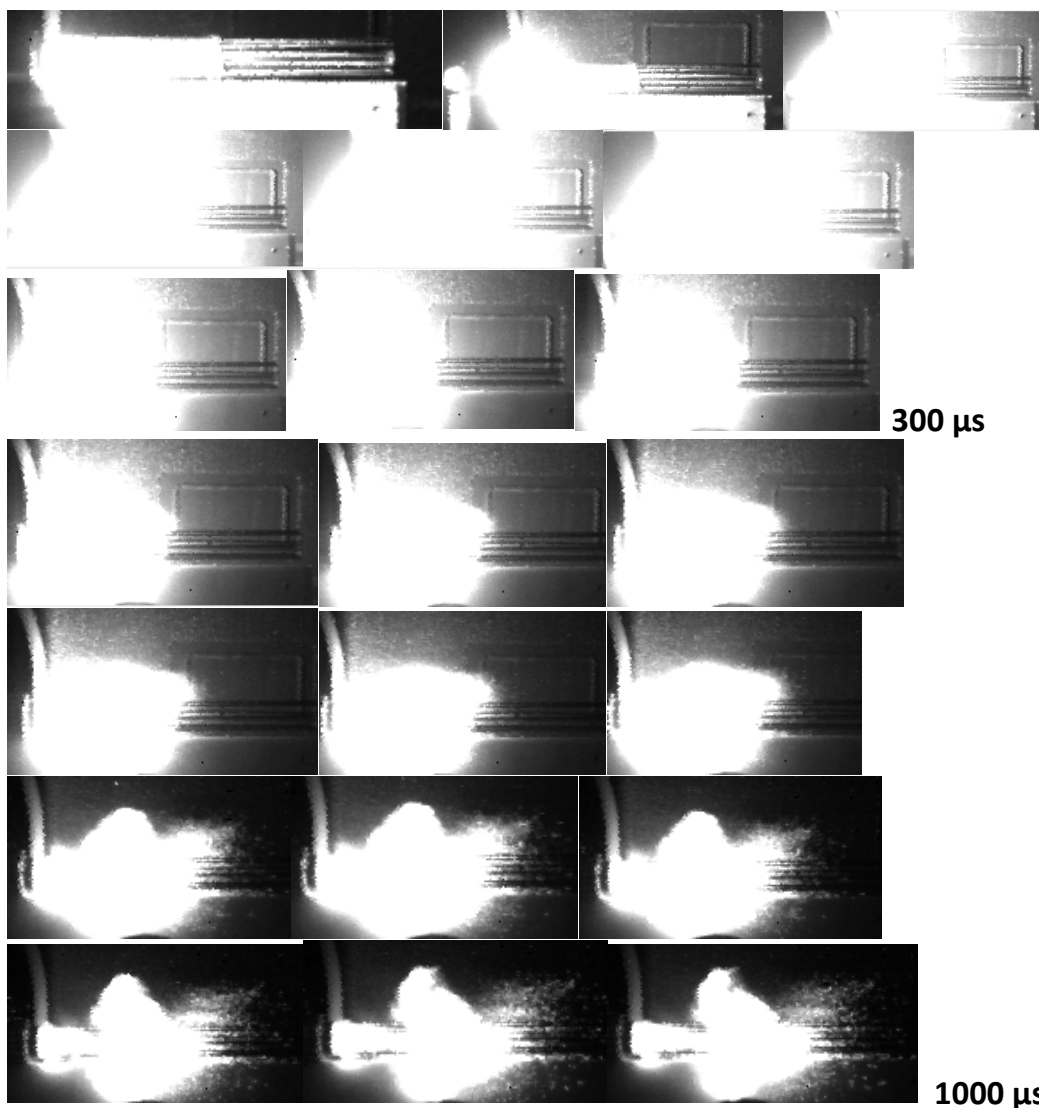
A picture with exposition time extended by three orders of value (to 30 ms – see photos 4) provides an interesting result. Such long exposition provides much more light to the camera and greater area of air stimulated by plasma is recorded (it is not

stosowaniu fotografii szybkiej).

Nieograniczona niczym plazma przed wychłodzeniem i neutralizacją penetruje bardzo duży obszar.

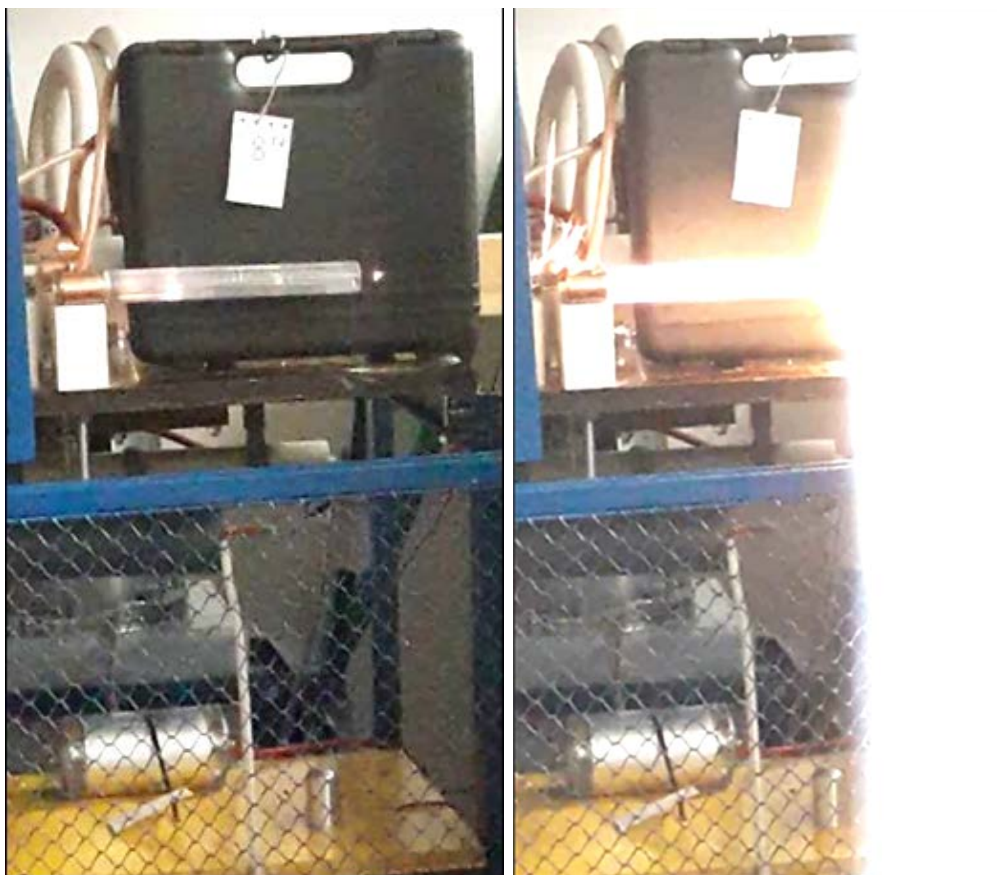
visible at high speed recording).

Not contained plasma penetrates quite significant area before cooling and neutralisation.



**Fot. 3.** U góry – widok zapłonika i przebieg prądowy, niżej - rozwój wyładowania (czas ekspozycji 25  $\mu$ s)

*Photo 3.* On the top – a view of the igniter and graph of the current, below – progressing discharge (exposition time 25  $\mu$ s)



**Fot. 4. Zapłonnik, którego obszar wyladowczy został osłonięty szklaną rurą.  
Z lewej – przed strzałem, z prawej – w trakcie strzału**

***Photo 4. Igniter with the discharging area contained within a glass tube.  
On the left – before firing, on the right – during the firing***

## **Wnioski**

Mechanizm MHD ma realne perspektywy zastosowań w konstrukcji zapłonika mało wrażliwych miotających materiałów wybuchowych.

W przypadku ażurowej elektrody zewnętrznej mamy do czynienia zarówno z dyfuzyjnym jak i magnetohydrodynamicznym mechanizmem ekspansji plazmy. Udział obu tych mechanizmów w procesie ekspansji plazmy można regulować odpowiednio dostosowując stopień przezroczystości elektrody zewnętrznej, co może mieć istotne znaczenie dla konkretnych zastosowań zapłonika.

## **Conclusions**

There are real perspectives to use the MHD mechanism to ignite low vulnerability gun propellants.

In the case of perforated external electrode both diffusive and magnetohydrodynamic plasma expansion mechanisms occur.

The effect of the two mechanisms in plasma expansion may be controlled by matching the transparency of the external electrode what is essential for specific applications of the igniter.

## **Literatura / Literature**

- [1] Xingwen Li, Rui Li, Shenli Jia, Yucheng Zhang, Jianyu Qu, *Study on the Characteristics of Different Plasma Ignition Schemes*, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 41,

Numb. 1, January 2013

- [2] Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Exploding\\_Wire\\_Method](https://en.wikipedia.org/wiki/Exploding_Wire_Method)
- [3] Jakub Michalski, Zbigniew Leciejewski, *Closed Vessel Investigation of Propellant Ignition Process with Using Capillary Plasma Generator*, Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa – Problems of Mechatronics. Armament, Aviation, Safety Engineering, Vol.6, No 1(19) p.19-26, 2015
- [4] Marek Rabiński, Krzysztof Zdunek, *Physical Model of Dynamic Phenomena in Impulse Plasma Coaxial Accelerator*, Vacuum, vol. 48, Numb. 7-9, p. 715-718, 1997
- [5] D. Grune, D. Hensel, *Combustion Behavior of LOVA-Solid-Propellant by Ignition with Plasma Gases and its Influence on the Interior Ballistic Cycle*, Proceedings of the 17th International Symposium on Ballistics, Vol. 1, pp. 359-366, Nidrand , South Africa, 23-27 March, 1998
- [6] Martin Rott, Christian Artlet, Till Hoschen, *Experimental Investigation of Hypervelocity Plasma Jets Generated With a Coaxial Arc Device*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 41, No. 1, pp. 220-225, 2005

