



ANALIZA MATEMATYCZNA PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH SPŁONKI POBUDZAJĄCEJ M-100 JAKO WSTĘP DO BADAŃ LABORATORYJNYCH

MATHEMATICAL ANALYSIS OF ELECTRICAL PARAMETERS OF M-100 ELECTRODETONATOR AS THE INTRODUCTION TO LABORATORY RESEARCH

Cezary KWIECIEN

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
Military Institute of Armament Technology

Streszczenie: W artykule przedstawiono fundamentalne obliczenia analityczne w zakresie inicjacji elektrycznej spłonki pobudzającej M-100 na podstawie danych katalogowych jednego z producentów. Przedstawiono również kompleksową analizę podatności spłonki M-100 na elektryczność statyczną, której źródłem jest człowiek. Dokonano uogólnienia popularnego wzoru na energię zapłonu z uwzględnieniem strat czynnych obwodu strzałowego. Dodatkowo przedstawiono wyprowadzenia innych, szczególnych postaci wzorów wraz z przykładami ich użycia. Z uwagi na skąpą, fragmentaryczną i chaotyczną dostępną wiedzę na temat obliczeń warunków pobudzenia elektrycznego spłonek elektrycznych z tzw. „gorącym mostkiem oporowym” (HBW, ang. **H**ot **B**ridge**W**ire), starano się uporządkować i zaprezentować w sposób przejrzysty stosowany w praktyce aparat matematyczny wraz z wyprowadzeniami wzorów, komentarzem i fachową terminologią.

Słowa kluczowe: M-100, M100, spłonka, detonator, HBW

1. Wstęp

Spłonki pobudzające M-100 zwane również detonatorami (nazwa producenta EaglePicher: „M-100 Microdetonator”, MIL-SPEC INDUSTRIES: „M100 MICRO DETONATOR”) są nowością w polskim sektorze zbrojeniowym. Z tego powodu zaistniała potrzeba ich dogłęb-

Abstract: The paper presents fundamental analytical calculations for the electrical initiation of M-100 electrodetonator based on the catalogue data of a producer. The comprehensive analysis of the M-100 electrodetonator vulnerability to the static electricity originating from the human body is also presented. The generalization of the popular formula for igniting energy regarding the real losses of energy in fire circuit was made. Additionally the derivations of other particular forms of formulas with examples of use are shown. Due to the poor, fragmentary and chaotic available knowledge upon calculations of conditions of electrical initiation of electrodetonators with so called **H**ot **B**ridge**W**ire (HBW) an effort towards a proper arrangement and clear presentation of the commonly used mathematical apparatus along with derivation of formulas, comments and special terminology was made.

Keywords: M-100, M100, primer, detonator, HBW

1. Introduction

The initiating primers M-100 are also called as detonators (the name given by manufacturer EaglePicher: „M-100 Microdetonator”, MIL-SPEC INDUSTRIES: „M100 MICRO DETONATOR”) are some new designs in the Polish armament sector.

nego przebadania w celu zdobycia wiedzy na ich temat tak, aby możliwe było maksymalnie bezpieczne i niezawodne działanie ich w nowo opracowywanych konstrukcjach. Słonka (fot. 1) ma aluminiową obudowę walcową o średnicy 2,54 mm i długości 6,35 mm zakończoną z jednej strony wgłębieniem kumulacyjnym w kształcie półsfery, służącym do tzw. „wybuchowego formowania pocisku” (EFP, ang. Explosively Formed Projectiles). Z drugiej strony zakończoną połączonym, niez izolowanym przewodem o średnicy 0,48 mm i długości 5,59 mm, będącym jednym z wyprowadzeń mostka oporowego. Drugie wyprowadzenie połączone jest z obudową słonki, w której znajduje się 3 mg dekstrynowanego azydki ołowiu. Masa słonki - 35 mg.

1. Obliczenia

2.1. Energia zapłonu i impuls zapłonu słonki M-100. Obliczenie metodą uproszczoną – przypadek szczególny

Jeden z producentów, EaglePicher podaje warunek pewnego zadziałania (All-fire current) jako podłączenie słonki do kondensatora o pojemności 100 mF, naładowanego do napięcia o wartości równej 1,6 V. Zakłada również temperaturę układu równą 21 °C. W tych warunkach detonacja słonki ma nastąpić w czasie nie dłuższym niż 300 μs. Ponieważ słonki pobudzające zbudowane są z względnie dużej ilości materiału wybuchowego inicjującego, to czas detonacji $t_d = 300 \mu s$ jest dłuższy od czasu zapłonu t_z słonki. Różnica czasów wynika z propagacji fali detonacyjnej od mostka oporowego do denka kumulacyjnego w materiale inicjującym wewnątrz słonki. Łatwo oszacować, że dla M-100 będzie to czas bliski 0,8 μs. Prędkość detonacji v_d azydki ołowiu w zależności od gęstości wynosi od 4630 m/s do 5300 m/s. Przyjmując szacunkowo początek drogi detonacji od połowy długości walca słonki (0,5 x 6,35 mm) do ok. 5 mm otrzymujemy:

$$t_d - t_z = \frac{l}{v_d} = \frac{0,5 \cdot 6,35 \text{ mm} \div 5 \text{ mm}}{4,63 \frac{\text{mm}}{\mu s} \div 5,3 \frac{\text{mm}}{\mu s}} = (0,60 \div 1,08) \mu s \approx 0,8 \mu s$$

Niewielka różnica czasów detonacji i zapło-

For this reason a need for detailed testing of them has appeared to get the knowledge providing their safe and reliable implementation in newly developed designs. The primer (photograph 1) has an aluminium cylinder casing with 2.54 mm and length 6.35 mm that is terminated from one side by a cumulative cone in the shape of hemisphere to use explosively formed projectile (EFP) effect. On the other side there is a naked gilded wire with 0.48 mm diameter and 5.59 mm length that is one of outputs of the resistance bridge. The second output of the bridge is the casing of the primer that includes 3 mg of lead azide dextrin. The weight of the primer is 35 mg.

2. Calculations

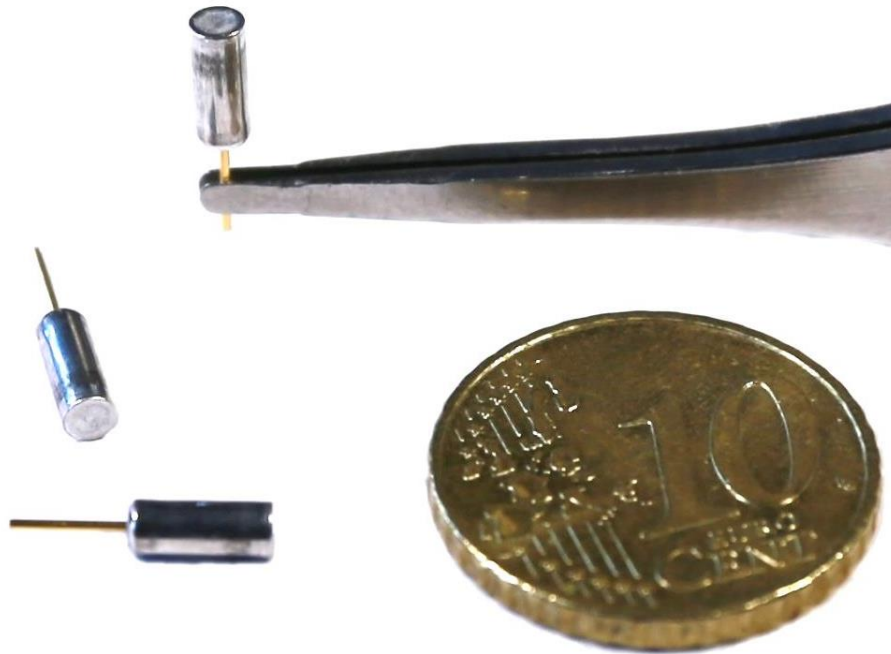
2.1. The igniting energy and pulse for primer M-100. Calculations by a simplified method – particular case

EaglePicher one of manufacturers claims that the reliable initiation (All-fire current) happens in condition of connecting the primer to the capacitor of 100 mF loaded to the voltage of 1,6 V. The assumed temperature is 21 °C. In these conditions the detonation of the primer happens within the time that is no longer than 300 μs. Because the initiating primers consist of a relatively great amount of initiating explosive material then the time of detonation $t_d = 300 \mu s$ is longer than the primer ignition time t_z . The difference of times comes from the propagation of detonating wave between the resistance bridge and cumulative cone in the initiating material inside the primer. It is easy to estimate that this time equals to ca. 0.8 μs for M-100. The velocity of detonation v_d for the lead azide depends on its density and varies between 4630 m/s to 5300 m/s. Assuming that the starting place of a detonating path is in the middle of the primer cylinder (0,5 x 6,35 mm) to ca. 5 mm gives:

A little difference of detonation and ignition

nu pozwala przyjąć $t_z = t_d$. Rezystancja drutu oporowego mostka w temperaturze 21 °C wynosi od 3,5 Ω do 7 Ω. Pojemność 100 mF (0,1 F) jest w praktyce tak duża, że do obliczeń związanych z warunkami zapłonu bez zauważalnego błędu (co zostanie wykazane później) można potraktować ją jako idealne źródło napięcia stałego. Dlatego zastępujemy kondensator siłą elektromotoryczną SEM o wartości $\varepsilon = 1,6$ V.

times allows the assumption $t_z = t_d$. The resistance of the wire in the bridge is between 3.5 Ω to 7 Ω at temperature 21° C. The capacity of 100 mF (0.1 F) is in practice so high that for the calculations connected with the conditions of the ignition without a noticeable error (what will be proved later) it may be treated as a source of an ideal direct voltage. For this reason the capacitor is replaced by electromotive force SEM with value $\varepsilon = 1.6$ V.



Fot. 1. Spłonki pobudzające M-100. Producent MIL-SPEC INDUSTRIES.
Źródło: foto A. Seń

Photograph 1. Initiating primers M-100. Manufacturer MIL-SPEC INDUSTRIES.
Origin: A. Seń

Najważniejszym parametrem pobudzenia wszystkich typów spłonek elektrycznych jest energia zapłonu E_z . W przypadku spłonek mostkowych jest ona równa minimalnej ilości ciepła wydzielonego w krótkim czasie t_z na mostku oporowym, w większości przekazanemu chemicznej substancji zapalającej lub pobudzającej (materiał wybuchowy inicjujący) i powodującej zadziałanie spłonki. Zgodnie z prawem Joule'a-Lenza energia przepływającego przez mostek oporowy stałego prądu elektrycznego o natężeniu I przekształca się na ciepło:

The most important characteristic concerning the initiation of all types of electric primers is the energy of ignition E_z . In the case of bridge primers it equals to a minimal amount of heat dissipated in a short time t_z in the resistance bridge and mostly transferred to the chemical igniting or initiating mixture (initiating explosive material) that causes the activation of the primer. According to Joule-Lenz law the energy of the direct electric current with intensity I passing through the resistance bridge is transformed into the heat:

$$Q = E = I^2 t R_M \quad [J] \quad (1)$$

gdzie R_M - jest rezystancją mostka. W celu obliczenia energii zapłonu E_Z spłonki skorzystajmy z przekształcenia:

$$E_Z = I^2 t_Z R_M = \frac{\varepsilon^2}{R_M^2} \cdot t_Z \cdot R_M = \frac{\varepsilon^2}{R_M} \cdot t_Z \quad (2)$$

Podany w katalogu przedział wartości rezystancji mostka R_M w zakresie od $R_{Mmin} = 3,5 \Omega$ do $R_{Mmax} = 7 \Omega$ spowodowany jest niedoskonałym procesem technologicznym, co jest typowe. Od razu nasuwa się pytanie: Jaką wartość rezystancji mostka R_M należy użyć do obliczeń energii zapłonu? Odpowiedź na to pytanie może dać założenie równości energii zapłonu dla pełnego rozrzutu produkcyjnego rezystancji mostka w granicach R_{Mmin} i R_{Mmax} . Założenie to prowadzi do stworzenia równania o postaci:

$$E_Z = \frac{\varepsilon^2}{R_{Mmin}} \cdot t_{Zmin} = \frac{\varepsilon^2}{R_{Mmax}} \cdot t_{Zmax} = const \quad (3)$$

Wynika z niego, że katalogowy czas zapłonu (detonacji spłonki) równy $300 \mu s$ jest czasem t_{Zmax} (tzw. „najgorszy przypadek”) i odpowiada on pobudzeniu spłonki o maksymalnej wartości rezystancji R_{Mmax} mostka oporowego z całego zakresu rozrzutu produkcyjnego. Minimalna ilość energii potrzebnej do zapewnienia zadziałania spłonki o rezystancji mostka z całego zakresu rozrzutu produkcyjnego wynosi:

$$E_Z = \frac{\varepsilon^2}{R_{Mmax}} \cdot t_{Zmax} = \frac{1,6^2}{7} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 109,71 \approx 110 [\mu J] \quad (4)$$

Innym praktycznym parametrem związanym z warunkami pobudzenia elektrycznego wyłączenie spłonek mostkowych jest tzw. „impuls zapłonu” k_Z , zdefiniowany jako:

$$k_Z = \int_0^{t_Z} i(t)^2 dt \quad [A^2 s = \frac{V}{\Omega} As = \frac{W}{\Omega} s = \frac{J}{\Omega}] \quad (5)$$

gdzie $i(t)$ to natężenie chwilowe prądu. W katalogach producentów często podawany jest tzw. „stałoprądowy impuls zapłonu”:

$$k_Z = I^2 t_Z \quad (6)$$

Where R_M is the bridge resistance. In order to calculate the primer ignition energy E_Z the following transformation is used:

The range of bridge resistance values R_M between $R_{Mmin} = 3.5 \Omega$ to $R_{Mmax} = 7 \Omega$ is caused by some typical imperfections of technological process. The question appears about a specific value of bridge resistance value R_M that has to be used to calculate the energy of ignition. The answer may be given by an assumption of the equality of the ignition energy within a full technological spread of bridge resistance between R_{Mmin} and R_{Mmax} . This assumption leads to the following equation:

The equation leads to the conclusion that the ignition time (primer detonation) given in the catalogue that equals to $300 \mu s$ is the time t_{Zmax} (so called „the worst case”) and it corresponds the initiation of the primer with the maximum value of technological spread of resistance R_{Mmax} in the resistance bridge. The minimum amount of energy needed for the activation of the primer at bridge resistances covering the technological spread of values is:

Another practical characteristic relating to the conditions of electric initiation applied exclusively for bridge primers is so called “ignition pulse” k_Z defined as:

where $i(t)$ is a temporary intensity of the current. In catalogues provided by manufacturers often so called “constant-current ignition pulse” is given:

Przeprowadźmy obliczenie stałoprądowego impulsu zapłonu dla spłonki M-100:

The constant-current ignition pulse for the primer M-100 may be calculated as:

$$k_Z = \frac{\varepsilon^2}{R_{Mmax}^2} \cdot t_{Zmax} = \frac{1,6^2}{7^2} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 15,67 \approx 15,7 \left[\frac{\mu J}{\Omega} \right]$$

Wróćmy do przedstawionych przez jednego z producentów danych katalogowych. Autor zwrócił uwagę czytelnika na dużą wartość pojemności dla warunku pewnego zadziałania. Ponieważ spłonki mostkowe najczęściej współpracują z kondensatorami w tzw. „układach kondensatorowych”, producent podał parametr, jakim jest pojemność kondensatora, równą 100 mF. W praktycznych, kondensatorowych układach strzałowych nie stosuje się tak dużych pojemności. Można rzec, że podana pojemność jest absurdalnie duża dla jakichkolwiek spłonek, a w szczególności dla spłonek szybkich, czytaj wrażliwych na pobudzenie elektryczne, a do takich zalicza się omawiana spłonka. Z tego powodu istnieje prawdopodobieństwo, że dane katalogowe zawierają błąd. Najprawdopodobniej powinno być 100 μ F zamiast 100 mF. Weryfikacja tego faktu możliwa jest jedynie w trakcie badań laboratoryjnych. Jaki wpływ miałyby to na warunki pobudzenia spłonki? Odpowiedź na to pytanie znajdziemy poniżej.

We have to return for catalogue data provided by one of manufacturers. Author has pointed out that the value of capacitor providing the reliable operation is high. Because the bridge primers usually work together with capacitors in so called “capacitor systems” the manufacturer presented the parameter in the value of capacity equal to 100 mF. In practical capacitor firing systems such high capacities are not used. It seems that the given capacity is senselessly high for any primer and especially for rapid primers that is sensitive to electric initiation like the primer considered here. For this reason it is possible that there is an error in catalogue data. It probably has to be 100 μ F instead 100 mF. The verification of this postulate is possible by laboratory experiments. The answer on the question concerning the impact of the above into the conditions of primer’s initiation will be provided below.

2.2. Uogólniony wzór na energię zapłonu i impuls zapłonu

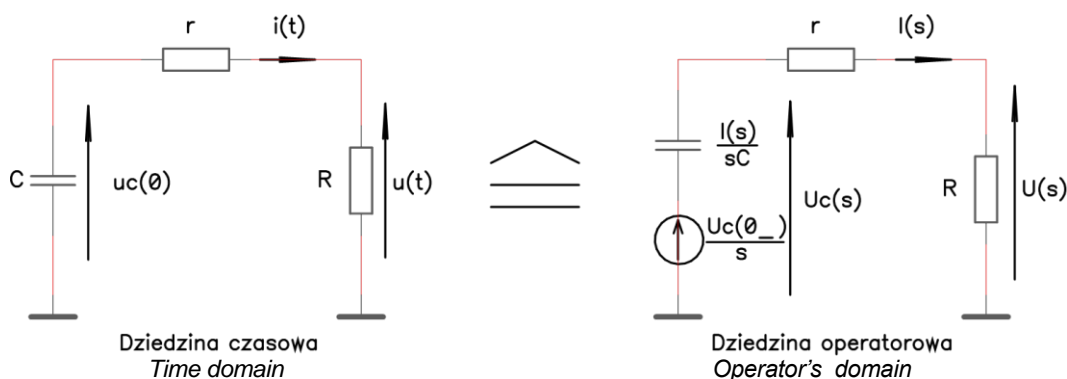
2.2. General formula for energy and pulse of ignition

Z punktu widzenia konstruktora istotnym parametrem obwodu strzałowego (zapłonowego) jest minimalna wartość napięcia naładowania kondensatora(ów) U_Z o określonej pojemności C , umożliwiająca zadziałanie spłonki elektrycznej dla określonego czasu zapłonu t_Z , przy ewentualnych istotnych stratach czynnych (rezystancyjnych) w obwodzie strzałowym. Z uwagi na względnie dużą temperaturę przepalenia mostka oporowego (rzędu tysiąca $^{\circ}$ C) w odniesieniu do przedziału temperaturowego pracy układu (przykładowo: -40° C \div $+60^{\circ}$ C) zagadnienie temperatury układu w praktyce jest pomijane. Ponadto w praktycznych obliczeniach analitycznych nie uwzględnia się strat czynnych, a zamiast tego przyjmuje się do obliczeń obwodu strzałowego kilkukrotną wartość energii zapłonu E_Z . W poprawnie zaprojektowanych obwodach strzałowych jest to wystarczające do zapewnienia

For the designer an essential characteristic of the firing (igniting) circuit is a minimal value of the voltage U_Z to what a specific capacity C has to be loaded and that provides the activation of the electric primer within a specific ignition time t_Z at possible losses caused by the resistance of the firing circuit. As the burning temperature for the resistance bridge is high (ca. one thousand $^{\circ}$ C) comparing to the range of temperatures in which the system works (e.g. -40° C \div $+60^{\circ}$ C) then the issue of system’s temperature is omitted. Moreover in practical analytical calculations the losses by pure resistance are not taken into account but instead in the calculations of the firing circuit the value of ignition energy E_Z is a few times greater. In properly designed firing circuits it provides the reli-

pewnego zadziałania. Również niewielkie indukcyjności obwodu są pomijane. W literaturze, np. [2] można spotkać praktyczne wzory na minimalną wartość napięcia kondensatorów strzałowych U_Z . Jak wspomniano wyżej pomijają one straty czynne (rezystancyjne) w obwodzie strzałowym. Z uwagi na potrzebę niniejszej pracy, celem przeprowadzenia obliczeń dla narażeń na wyładowania ESD (ang. **E**lectro**S**tatic **D**ischarge) poniżej zostanie wyprowadzony uogólniony wzór na energię zapłonu E_Z . Uogólnienie może być przydatne w przypadku np. rzadziej spotykanych w praktyce danych katalogowych, zawierających rezystancję czynną w warunkach pobudzenia (np. „MK-71 Electric Detonator, EaglePicher”). Załóżmy pobudzenie ładunkiem zgromadzonym na kondensatorze o pojemności C , rezystancję drutu oporowego mostka R i rezystancję wszelkich czynnych strat w obwodzie r (suma rezystancji szeregowej ESR (ang. **E**quivalent **S**eries **R**esistance) kondensatora, rezystancji klucza zamykającego obwód, złącz, przewodów itp.). W rzeczywistości wartość rezystancji mostka R nie jest stała w czasie i wraz z nagrzewaniem zwiększa się w niewielkim zakresie. Przykładowo dla mostka chromonikielinowego rezystancja zwiększa się o ok. 4% [3]. Korzystamy z optymalnej z punktu widzenia obliczeń ręcznych metody operatorowej Laplace’a, rys.1.

able activation. There are also omitted small inductive parts of the circuit. In the literature, e.g. [2], the practical formulas for the minimal value of voltage U_Z of firing capacitors are given. As it was mentioned they omit the losses of real resistance in the firing circuit. As the subject of the hereby paper deals with the calculations of threats caused by electrostatic discharge (ESD) a general formula on the igniting energy E_Z will be presented below. The generalisation may be useful at rarely spotted in practice catalogue data including pure resistance in conditions of initiation (e.g. „MK-71 Electric Detonator, EaglePicher”). Let’s assume the initiation by the charge collected on the capacitor C , the resistance of the wire in the bridge R and the resistance of all active losses in the circuit r (equivalent series resistance – ESR of the capacitor, the switch that shorts the circuit, connectors, cables, etc.). In reality the resistance R of the bridge is not constant in time and it increases in some degree along the temperature. For example the bridge made from a chromenickel wire the resistance increases by ca. 4 % [3]. Let’s use the Laplace operator method that is optimal for hand calculations, figure1.



Rys. 1. Schemat elektryczny przyjętego modelu obwodu strzałowego

Źródło: opr. wł.

Figure 1. Electric diagram of the assumed model of the firing circuit

Source: prepared by the author

Gdzie $U_C(0_-)$ – potencjał kondensatora przed zamknięciem obwodu strzałowego. Dla poprawienia czytelności przekształceń przyjmijmy, że $U_C(0_-) = U$. Korzystając z zależ-

where $U_C(0_-)$ – potential of the capacitor before shorting the firing circuit. To improve the simplicity of transformations we can assume that $U_C(0_-) = U$. Using the expressions

ności na dzielnik napięcia wyznaczamy przebieg napięcia na rezystancji R drutu oporowego mostka spłonki w dziedzinie operatorowej, $U(s)$:

for the voltage divider we describe the value of the voltage on the resistance R of the wire of primer bridge in the operator's domain $U(s)$:

$$U(s) = \frac{U}{s} \cdot \frac{R}{R+r+\frac{1}{sC}} = \frac{U}{s} \cdot \frac{1}{1+\frac{r}{R}+\frac{1}{sRC}} = \frac{U}{s} \cdot \frac{s}{s\left(1+\frac{r}{R}\right)+\frac{1}{RC}} = U \cdot \frac{1}{s\left(1+\frac{r}{R}\right)+\frac{1}{RC}} =$$

$$= U \cdot \frac{1}{s\left(\frac{r+R}{R}\right)+\frac{1}{RC}} = \frac{UR}{R+r} \cdot \frac{1}{s+\frac{1}{RC}\frac{R}{R+r}} = \frac{UR}{R+r} \cdot \frac{1}{s+\frac{1}{C(R+r)}}$$

Odnajdujemy w tablicy transformat Laplace'a zależność:

We can find in the Laplace table of transformations the dependence:

$$e^{\alpha t} \cdot \mathbf{1}(t) \cong \frac{1}{s-\alpha},$$

gdzie $\mathbf{1}(t)$
 $= \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ 1 & \text{dla } t \geq 0 \end{cases}$ (tzw. funkcja skoku jednostkowego)

where $\mathbf{1}(t)$
 $= \begin{cases} 0 & \text{for } t < 0 \\ 1 & \text{for } t \geq 0 \end{cases}$ (unit jump function)

Powyższa postać występuje rzadko. Przeważnie spotyka się postać, w której funkcja skoku jednostkowego (funkcja Heaviside'a) występuje niejawnie:

The above form exists rarely. The unit jump function (Heaviside function) usually is used in the covert form:

$$e^{\alpha t} \cong \frac{1}{s-\alpha}$$

Zdaniem autora zapis ją zawierający jest bardziej precyzyjny. Przekształcamy dalej:

The author claims that this form is more precise. After further transformations:

$$U(s) = \frac{UR}{R+r} \cdot \frac{1}{s+\frac{1}{C(R+r)}} = \frac{UR}{R+r} \cdot \frac{1}{s-\frac{-1}{C(R+r)}} = \frac{UR}{R+r} \cdot \frac{1}{s-\alpha'}$$

gdzie $\alpha = \frac{-1}{C(R+r)}$.

where $\alpha = \frac{-1}{C(R+r)}$.

Następnie przechodzimy z dziedziny operatorowej „s” na dziedzinę czasu „t”:

Next we pass from the operator's domain “s” to the domain of time „t”:

$$u(t) = \frac{UR}{R+r} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \mathbf{1}(t);$$

gdzie $\tau = (R+r)C$ – stała czasowa rozładowania kondensatora

where $\tau = (R+r)C$ – capacitor unloading time coefficient

Analogicznie funkcja wartości chwilowej prądu $i(t)$ płynącego przez mostek oporowy ma postać:

Similarly the function of momentary current value $i(t)$ flowing through the resistance bridge has the shape:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{U}{R+r} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \mathbf{1}(t)$$

Energia pobudzenia elektrycznego E przekazana do mostka oporowego w czasie t:

The energy of electric initiation E transferred to the resistance bridge in time t is:

$$E = \int_0^t u(t)i(t)dt = \int_0^t \left(\frac{UR}{R+r} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \frac{U}{R+r} e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \cdot dt = \frac{U^2 R}{(R+r)^2} \int_0^t e^{-\frac{2t}{\tau}} dt$$

ponieważ: / because:

$$\int e^{-\frac{2t}{\tau}} dt = -\frac{\tau}{2} e^{-\frac{2t}{\tau}} + C$$

to: / then:

$$E = \frac{U^2 R}{(R+r)^2} \cdot \left[-\frac{\tau}{2} e^{-\frac{2t}{\tau}} \right]_0^t = \frac{U^2 R \tau}{2(R+r)^2} \cdot \left(-e^{-\frac{2t}{\tau}} + 1 \right) = \frac{U^2 R(R+r)C}{2(R+r)^2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t}{\tau}} \right)$$

$$E = \frac{U^2 RC}{2(R+r)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t}{\tau}} \right) = \frac{U^2 RC^2}{2C(R+r)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t}{\tau}} \right) = \frac{U^2 RC^2}{2\tau} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t}{\tau}} \right)$$

Podstawiając R_{\max} za R, U_Z za U minimalna energia zapłonu E_Z dla czasu t_Z wynosi:

Substituting R_{\max} for R, U_Z for U the minimal ignition energy E_Z for time t_Z is:

$$E_Z = \frac{U_Z^2 R_{\max} C}{2(R_{\max} + r)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_Z}{(R_{\max} + r)C}} \right) \quad (7)$$

lub inaczej pamiętając, że:

or in other way remembering that:

$$\tau = (R_{\max} + r)C \quad (8)$$

$$E_Z = \frac{U_Z^2 R_{\max} C^2}{2\tau} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_Z}{\tau}} \right) \quad (9)$$

impuls zapłonu wynosi:

the ignition pulse equals to:

$$k_Z = \frac{E_Z}{R_{\max}} = \frac{U_Z^2 C}{2(R_{\max} + r)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_Z}{(R_{\max} + r)C}} \right) \quad (10)$$

lub inaczej:

or in other way:

$$k_z = \frac{U_z^2 C^2}{2\tau} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{\tau}}\right) \quad (11)$$

Po prostych przekształceniach otrzymujemy postać ogólną wzoru na minimalną wartość napięcia kondensatora strzałowego w funkcji $U_Z = f(E_Z, R_{max}, r, C, t_z)$ oraz $U_Z = f(E_Z, R_{max}, \tau, C, t_z)$:

After these simple conversions we get the general formula for the firing capacitor minimal voltage value in the function $U_Z = f(E_Z, R_{max}, r, C, t_z)$ oraz $U_Z = f(E_Z, R_{max}, \tau, C, t_z)$:

$$U_Z = \sqrt{\frac{2E_Z(R_{max} + r)}{CR_{max} \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{(R_{max}+r)C}}\right)}} = \sqrt{\frac{2E_Z \tau}{C^2 R_{max} \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{\tau}}\right)}} \quad (12)$$

bądź w postaci $U_Z = f(k_z, R_{max}, r, C, t_z)$ oraz $U_Z = f(k_z, \tau, C, t_z)$:

or in the form $U_Z = f(k_z, R_{max}, r, C, t_z)$ oraz $U_Z = f(k_z, \tau, C, t_z)$:

$$U_Z = \sqrt{\frac{2k_z(R_{max} + r)}{C \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{(R_{max}+r)C}}\right)}} = \sqrt{\frac{2k_z \tau}{C^2 \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{\tau}}\right)}} \quad (13)$$

2.3. Energia zapłonu i impuls zapłonu spłonki M-100. Obliczenie metodą właściwą

2.3. Energy and pulse of ignition for M-100 primer. Calculation by a proper method

Chcąc ponownie obliczyć minimalną energię i impuls zapłonu skorzystajmy z równań (7) i (10). Ponieważ katalogowe warunki pewnego zadziałania nie odnoszą się do strat w obwodzie przekształcamy powyższy wzór ogólny (7) do prostszej, klasycznej postaci:

In order to calculate again the minimal energy and pulse of the ignition we can use the equations (7) and (10). As the catalogue conditions of reliable activations do not refer to the losses in the circuit then we can transform the general formula (7) into a simpler classical form:

$$E_Z = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{U_z^2 R_{max} C}{2(R_{max} + r)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{(R_{max}+r)C}}\right) = \frac{U_z^2 R_{max} C}{2R_{max}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right)$$

$$E_Z = \frac{U_z^2 C}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right) \quad (14)$$

$$k_z = \frac{U_z^2 C}{2R_{max}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right) \quad (15)$$

Obliczamy energię E_Z i impuls zapłonu k_z dla katalogowych warunków pobudzenia (kondensator 100 mF):

We can calculate the energy E_Z and pulse k_z of the ignition for the system with the capacitor of 100 mF:

$$E_z = \frac{U_z^2 C}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right) = \frac{1,6^2 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}}\right) = 109,67 \approx \mathbf{110} [\mu J]$$

$$k_z = \frac{E_z}{R_{max}} = \frac{109,67 \cdot 10^{-6}}{7} = 15,67 \approx \mathbf{15,7} [\mu \frac{J}{\Omega}]$$

Otrzymujemy wyniki zbieżne z obliczeniami dla przypadku szczególnego, tj. po zastąpieniu kondensatora źródłem SEM. Nasuwa się pytanie: Dlaczego w katalogowych warunkach pobudzenia nie podano źródła SEM, co praktycznie byłoby równoważne? Obliczenia dla układu z kondensatorem o pojemności 100 μF :

The results we get coincide with the calculations for the particular case i.e. after replacing the capacitor by electromotive force SEM. The question is why in the catalogue conditions of initiation the source SEM was not given what practically would be the same? The calculations for the system with 100 μF capacitor give:

$$E_z = \frac{U_z^2 C}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right) = \frac{1,6^2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}}\right) = 73,68 \approx \mathbf{74} [\mu J]$$

$$k_z = \frac{E_z}{R_{max}} = \frac{73,68 \cdot 10^{-6}}{7} = 10,53 \approx \mathbf{10,5} [\mu \frac{J}{\Omega}]$$

Niezależnie od tego, czy do obliczeń wykorzystaliśmy katalogową pojemność 100 mF czy 100 μF otrzymane wartości energii i impulsu zapłonu są znikome. Dla przykładu porównanie z popularną, krajową słonką pobudzającą „ERG” [4]. Rezystancja mostka oporowego słonki mieści się w zakresie 1,7 Ω ÷ 2,2 Ω . Warunek pewnego zadziałania: „Niezawodność odpalenia od prądu o natężeniu 0,5 A w czasie max. 0,15 s” („Reliability of explosion caused by 0,15 s impulse of 0,5 A current”). Stałoprądowy impuls i energia zapłonu wynoszą:

Independently from using in calculations the catalogue capacity 100 mF or 100 μF the received values of ignition energy and pulse are minimal. It can be compared with the Polish typical initiating primer „ERG” [4]. The resistance of the primer is between 1.7 Ω and 2.2 Ω . The condition of the reliable activation: “Reliability of explosion caused by 0,15 s impulse of 0,5 A current”. The constant current pulse and energy of ignition equal to:

$$k_z = I^2 t_z = 0,5^2 \cdot 0,15 = 37,5 \cdot 10^{-3} = 37,5 [\frac{mJ}{\Omega}]$$

$$E_z = k_z \cdot R_{max} = 37,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 = 82,5 \cdot 10^{-3} = 82,5 [mJ]$$

Słonki „ERG” wymagają dostarczenia energii pobudzenia o trzy rzędy wielkości większej. Wrażliwość słonki jest ceną za jej szybkość.

Przykład 1. Pocisk artyleryjski o działaniu odłamkowo-burzącym, HE (ang. High-Explosive) uderza w twardą przeszkodę z prędkością ok. 600 m/s. Obliczyć wartość napięcia naładowania kondensatorów strzałowych elektronicznego zapalnika uderzeniowe-

The primers „ERG” require the level of initiating energy to be three orders of values greater. The sensitivity of the primer is the price for its rapidness.

Example 1. The HE artillery shell hits a hard target with the velocity ca. 600 m/s. Calculate the loading voltage of firing 100 μF capacitors of the electronic percussion fuse providing the ignition of M-100 primer be-

go o pojemności 100 μF, umożliwiającą odpa-
 lenie spłonki M-100 zanim dojdzie do zgnie-
 cenia czepca balistycznego. Długość czepca
 l = 6 cm. Założyć zgniatanie plastyczne czepca
 i bezstratność obwodu strzałowego.
 Obliczamy czas zgniotu czepca balistycznego:

$$t = \frac{l}{V} = \frac{0,06 \text{ m}}{600 \text{ m/s}} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 100 \mu\text{s}$$

fore the ballistic cap is crushed. The length
 of the cap is l = 6 cm. Assume the plastic
 crushing of the cap and lack of losses in the
 firing circuit.

We calculate the time of crushing for the
 ballistic cap:

Stała czasowa τ dla przypadku maksymalnej,
 wynikającej z rozrzutu produkcyjnego rezy-
 stancji mostka oporowego równej 7 Ω wynosi:

$$\tau = R_{max} \cdot C = 7 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ [s]}$$

The time constant τ in the case of maximal
 value of bridge resistance that is 7 Ω caused
 by the technological spread is:

Skorzystajmy z postaci ogólnej wzoru na
 napięcie kondensatora strzałowego (12)
 i sprowadźmy ją do postaci klasycznej (16) i
 (17), niezależnionej od „r”:

Let's use the general formula for the firing
 capacitor voltage (12) and reduce it to the
 classical form (16) and (17) that does not
 depend on „r”:

$$U_z = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{\frac{2E_z(R_{max} + r)}{CR_{max} \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{(R_{max}+r)C}}\right)}} = \sqrt{\frac{2E_z R_{max}}{CR_{max} \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right)}} = \sqrt{\frac{2E_z}{C \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right)}} \\ U_z = \sqrt{\frac{2E_z}{C \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right)}} = \sqrt{\frac{2E_z}{C \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{\tau}}\right)}} \quad (16)$$

Obliczamy:

We calculate:

$$U_z = \sqrt{\frac{2 \cdot 110 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 10^{-4}}}\right)}} \approx 3,0 \text{ [V]}$$

W przypadku operowania impulsem zapłonu
 k_Z byłoby:

In the case of using the ignition pulse k_Z it
 would be:

$$U_z = \sqrt{\frac{2k_z}{CR_{max} \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right)}} = \sqrt{\frac{2k_z}{CR_{max} \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{\tau}}\right)}} \quad (17)$$

W przypadku rzeczywistej wartości pojem-
 ności równej 100 μF dla katalogowego wa-
 runku pobudzenia byłoby:

In the case of the real capacity that equals to
 100 μF it would be for the catalogue condition
 of initiation:

$$U_z = \sqrt{\frac{2E_z}{C \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{\tau}}\right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 74 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 10^{-4}}}\right)}} \approx 2,4 \text{ [V]}$$

Różnica napięć kondensatorów wynosi 0,6 V (dla 100 mF o 25 % więcej względem 2,4 V).

Odpowiedź: Minimalna wartość napięcia na kondensatorze o pojemności 100 μF, zapewniająca zadziałanie elektronicznego zapalnika uderzeniowego wynosi 3 V (lub 2,4 V).

Przykład 2. Obliczyć wartość napięcia na kondensatorze o pojemności 100 μF, zapewniającą zadziałanie spłonki M-100 w bezstratnym obwodzie strzałowym w temperaturze 21°C.

Otrzymany wyżej klasyczny wzór (16) na minimalną wartość napięcia U_z uniezależniamy od czasu:

The difference of capacitor voltages is 0.6 V (for 100 mF it is 25 % more than 2.4 V).

Answer: The minimal value of voltage on 100 μF capacitor that provides the activation of the electronic percussion fuse 3 V (or 2.4 V).

Example 2. Calculate the value of voltage on 100 μF capacitor providing the activation of M-100 primer in the lossless firing circuit at 21°C temperature.

From the above classical formula (16) for the minimal value of the voltage U_z we remove the time dependence.

$$U_z = \lim_{t \rightarrow +\infty} \sqrt{\frac{2E_z}{C \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{R_{max}C}}\right)}} = \sqrt{\frac{2E_z}{C(1 - e^{-\infty})}} = \sqrt{\frac{2E_z}{C(1 - 0)}} = \sqrt{\frac{2E_z}{C}}$$

$$U_z = \sqrt{\frac{2E_z}{C}} = \sqrt{\frac{2k_z}{R_{max}C}} \quad (18)$$

$$U_z = \sqrt{\frac{2 \cdot 110 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}}} \approx 1,48 \text{ [V]}$$

W przypadku rzeczywistej wartości pojemności równej 100 μF dla katalogowego warunku pobudzenia byłoby:

In the case of the real value of capacitor equal to 100 μF it would be for the catalogue condition of initiation:

$$U_z = \sqrt{\frac{2 \cdot 74 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}}} \approx 1,21 \text{ [V]}$$

Różnica napięć kondensatorów wynosi 0,27 V (dla 100 mF o 22,3 % więcej względem 1,21 V).

Odpowiedź: Minimalna wartość napięcia na kondensatorze o pojemności 100 μF, zapew-

The difference of capacitor voltages is 0.27 V (for 100 mF it is 22.3 % more than 1.21 V).

Answer: Minimal value of the voltage on 100 μF capacitor that ensures the activation

niająca zadziałanie spłonki M-100 w temperaturze 21°C wynosi 1,48 V (lub 1,21 V).

Zauważamy, że w przykładzie 2 otrzymaliśmy przekształcony, znany z podstaw elektrotechniki wzór na energię zmagazynowaną w kondensatorze:

$$E = C \frac{U^2}{2} \quad (19)$$

Nasuwa się pytanie: Jak wyglądałoby spełnienie katalogowego warunku zadziałania tj. $t_z = 300 \mu s$ przy założeniu prawdziwości zawartych w nim danych i zmniejszeniu pojemności kondensatora ze 100 mF na 100 μF ? Korzystając z klasycznego wzoru (16) obliczamy:

$$U_z = \sqrt{\frac{2 \cdot 110 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}}\right)}} \approx 1,95 [V]$$

Widzimy, że w celu zapewnienia czasu zadziałania t_z równego 300 μs tysiąckrotne zmniejszenie pojemności kondensatora wymagałoby zwiększenia napięcia na nim o zaledwie 0,74 V (61,2 %). Wyniki powyższych obliczeń umacniają hipotezę o błędzie w danych katalogowych.

2.4. Rozważania na temat podatności spłonki M-100 na wyładowania ESD

Podczas rozważań dotyczących czułości spłonki M-100 naturalnie nasuwa się pytanie: Czy możliwe jest odpalenie spłonki M-100 z potencjału zgromadzonego na ubraniu? W poszukiwaniu odpowiedzi na nie dobrym wydaje się być pomysł wykorzystania elektrycznego modelu ciała ludzkiego. Najpopularniejszym, powszechnie stosowanym przy badaniu oddziaływań ESD na elementy elektroniczne modelem ciała ludzkiego jest przedstawiony w standardach: JS-001-2012 [5] i MIL-STD-883H [6] model HBM (ang. „**H**uman-**B**ody **M**odel”). Tworzą go dwa szeregowo połączone elementy bierne: $C=100 \text{ pF}$ i $R=1,5 \text{ k}\Omega$, Rys. 2.a. Podczas tworzenia niniejszego modelu przebadano reprezentatywną próbkę

of M-100 primer at temperature 21°C is 1.48 V (or 1.21 V).

It may be noted that in the example No 2 we received the converted formula on the energy stored in the capacitor that is well known from the base of electrotechnique theory:

It is worth to find an answer to the question about meeting the catalogue condition of activation i.e. $t_z = 300 \mu s$ at the assumption that the data included in it are true and the capacity is decreased from 100 mF to 100 μF ? Using the classical formula (16) we calculate:

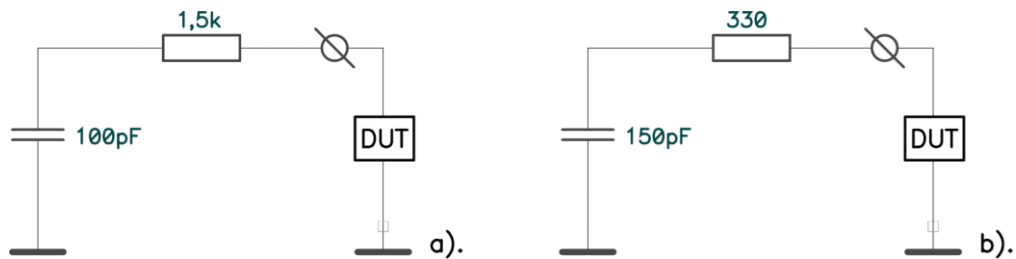
Then we can see that in order to maintain the time of activation t_z of 300 μs and after using the capacity that is one thousand times smaller it would require the increasing of the voltage by only 0.74 V (61.2 %). The results of the above calculations back the hypothesis that the catalogue data are erroneous.

2.4. Considerations on primer M-100 susceptibility against ESD

Considering the sensitivity of M-100 primer a question appears about possibility of firing M-100 primer by a potential collected on the clothes? It seems to be a good idea to use an electric model of human body to find the answer. The typical model of human body used at investigations of ESD impact on the electronic components is presented in the standards: JS-001-2012 [5] and MIL-STD-883H [6] model HBM (**H**uman-**B**ody **M**odel). It is created by two passive components connected in series: $C=100 \text{ pF}$ and $R=1.5 \text{ k}\Omega$ presented in figure 2.a. A representative population of people has been tested to develop this model. Typical capacity of

ludzi. Typowa wartość pojemności ciała ludzkiego wynosiła od 50 pF do 500 pF a 80 % przebadanej populacji miała pojemność do 100 pF. Rezystancja ciała ludzkiego zawierała się w zakresie od 100 Ω do 100 k Ω . Przeciętna wartość mieści się w przedziale od 500 Ω do 5 k Ω . Wartość rezystancji 1,5 k Ω modeluje przypadek typowego dotyku palcem do narażanego obiektu DUT (ang. **D**evice **U**nder **T**est). W przypadku dotyku nieizolowanym metalowym przedmiotem trzymany w ręku rezystancja ta znacząco spada. Rezystancja dotyku wewnętrzną stroną dłoni jest mniejsza niż końcówką palca z uwagi na zwiększoną powierzchnię kontaktu wewnętrznej strony dłoni z trzymany przedmiotem oraz mniejszą grubość naskórka wnętrza dłoni. Dlatego należy użyć innego modelu, np. HMM (ang. „**H**uman-**M**etal **M**odel”), rys. 2.b. Podczas badania pojemność rozładowuje się poprzez uziemiony badany obiekt DUT z określonego dla wymaganej klasy odporności poziomu napięcia.

human body was between 50 pF to 500 pF and 80 % of tested population had the capacity below 100 pF. The resistance of human body was between 100 Ω to 100 k Ω . The average value is in the range of 500 Ω to 5 k Ω . The value of resistance equal to 1.5 k Ω is used for modelling a case of typical touching DUT (**D**evice **U**nder **T**est) by a finger. In case of touching by a non-isolated metal object the resistance falls down essentially. The resistance of touching by the inner part of the hand is smaller than by the end of a finger as the surface of hand contact with the gripped object is greater and a thinner layer of skin. For this reason the other model has to be used e.g. HMM (**H**uman-**M**etal **M**odel) presented in figure 2.b. at testing the capacity unloads through the grounded DUT from the specific level of voltage determined for a required class of resistance.



Rys. 2. Schemat elektryczny modelu HBM (ang. Human-Body Model) (a) i modelu HMM (ang. Human-Metal Model) (b). Źródło: opracowanie własne

Figure 2. Electric diagrams of HBM (Human-Body Model) (a) and HMM (Human-Metal Model) (b)Source: prepared by the author.

Korzystamy z postaci ogólnej wzoru na minimalną wartość napięcia U_z kondensatora strzałowego (13), którą uniezależniamy od czasu. Dla ułatwienia obliczeń operujemy impulsem zapłonu k_z :

We can use the general form of the formula for the minimal value of voltage U_z on the firing capacitor (13) with the time factor removed. In order to simplify the calculations we use the ignition pulse k_z :

$$U_z = \lim_{t \rightarrow +\infty} \sqrt{\frac{2k_z(R_{max} + r)}{C \left(1 - e^{-\frac{2t_z}{(R_{max}+r)C}}\right)}} = \sqrt{\frac{2k_z(R_{max} + r)}{C(1 - e^{-\infty})}} = \sqrt{\frac{2k_z(R_{max} + r)}{C(1 - 0)}} = \sqrt{\frac{2k_z(R_{max} + r)}{C}} \quad (20)$$

Zakładając poprawność danych katalogowych liczymy:

Assuming the correctness of catalogue data we get:

$$U_{zHBM} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15,7 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + 1500)}{100 \cdot 10^{-12}}} = 21753,1 \approx 21,8 [kV]$$

Pamiętając, że podany impuls zapłonu k_Z jest obliczony dla warunku pewnego zadziałania należy mieć na uwadze, że w praktyce jego kilkukrotnie mniejsza wartość nie zapewnia niezadziałania. Jeśli założymy możliwość zadziałania dla impulsu zapłonu $k_Z' = 0,5 k_Z$ to sytuacja przedstawia się następująco:

Remembering that the given pulse of ignition k_Z is calculated for the condition of reliable activation it has to be pointed out that in practice its a few times smaller value does not guarantee the inactivation. If we reasonably assume a possibility of activation for ignition pulse $k_Z' = 0,5 k_Z$ then the situation is as follows:

$$U_{zHBM} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,5 \cdot 15,7 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + 1500)}{100 \cdot 10^{-12}}} = 15381,8 \approx 15,4 [kV]$$

W przypadku rzeczywistej wartości pojemności równej $100 \mu F$ dla katalogowego warunku pobudzenia byłoby:

If the real capacity equals to $100 \mu F$ then for the catalogue condition of initiation it would be:

$$U_{zHBM} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10,5 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + 1500)}{100 \cdot 10^{-12}}} = 17789,6 \approx 17,8 [kV]$$

Ponownie zakładamy $k_Z' = 0,5 k_Z$ i obliczamy:

Assuming again $k_Z' = 0,5 k_Z$ it gives:

$$U_{zHBM} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10,5 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + 1500)}{100 \cdot 10^{-12}}} = 12579,1 \approx 12,6 [kV]$$

Ponieważ człowiek zwykle ładuje się elektrostatycznie do napięcia z zakresu od $10 kV$ do $15 kV$ istnieje duże ryzyko pobudzenia uziemionej spłonki. W przypadku dotyku trzymanym w dłoni nieizolowanym, metalowym przedmiotem do wystającej końcówki uziemionej spłonki obliczenia przedstawiają się następująco:

As the human body is often loaded by an electrostatic charge to voltages between $10 kV - 15 kV$ then there is a great risk that the grounded primer may be initiated. In the case of touching the protruding end of grounded primer by a metal object kept in the hand the calculations are as follows:

$$U_{zHMM} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15,7 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + 330)}{150 \cdot 10^{-12}}} = 8399,1 \approx 8,4 [kV]$$

W przypadku rzeczywistej wartości pojem-

In the case of real capacity of $100 \mu F$ for

ności równej 100 μF dla katalogowego warunku pobudzenia byłoby:

$$U_{zHMM} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10,5 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + 330)}{150 \cdot 10^{-12}}} = 6868,8 \approx 6,9 \text{ [kV]}$$

W przypadku typowego naładowania elektrostatycznego człowieka do wartości z zakresu od 10 kV do 15 kV dotknięcie metalowym, nieizolowanym przedmiotem uziemionej spłonki (wyładowanie o takim charakterze poprzez uziemioną spłonkę) prawdopodobnie wywoła detonację wszystkich narażanych spłonek M-100. Dotknięcie palcem (zamknięcie obwodu poprzez dotyk palcem) może, ale nie musi skutkować detonacją. W praktyce badań odporności urządzeń i elementów elektronicznych na wyładowania ESD wykorzystuje się również inne modele ciała ludzkiego. Publikacja [7] prezentuje modele ciała kobiety i mężczyzny. Wydzielenie osobnych modeli z uwagi na płeć wzięło się głównie ze statystycznie częstszego noszenia przez kobiety obuwia na cieńszej podeszwie, co wpływa na pojemność. Fizycznym wytłumaczeniem tego zjawiska jest wzrost pojemności na wskutek zmniejszenia odległości pomiędzy jego okładzinami. Do dalszych szacunków skorzystamy z obydwu modeli:
Model kobiety (C=150 \div 500 pF, R= 50 \div 5000 Ω):

$$U_{z100mF} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15,7 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + (50 \div 5000))}{(150 \div 500) \cdot 10^{-12}}} = 1895,7 \div 32438,5 \approx (1,9 \div 32,4) \text{ [kV]}$$

$$U_{z100\mu F} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10,5 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + (50 \div 5000))}{(150 \div 500) \cdot 10^{-12}}} = 1550,3 \div 26528,1 \approx (1,5 \div 26,6) \text{ [kV]}$$

Model mężczyzny (C=80 \div 300 pF, R= 50 \div 5000 Ω):

$$U_{z100mF} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15,7 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + (50 \div 5000))}{(80 \div 300) \cdot 10^{-12}}} = 2447,4 \div 44418,2 \approx (2,4 \div 44,4) \text{ [kV]}$$

the catalogue condition of initiation it would be:

In the case of typical electrostatic loading of a man to the values of 10 kV to 15 kV the touching by a metal and non-isolated object to the grounded primer (discharging through the grounded primer) may cause the detonation of all tested primers M-100. The touching by a finger can cause but not must cause the detonation. In practice the tests of resistance of electronic equipment and components against ESD also other models human body are used. The publication [7] presents the models of man and woman bodies. The separate models were prepared considering the sex as the women usually wear shoes with a thinner soles what influences the capacity. The physical explanation of this phenomenon is the fact that the capacity increases when the distance between its plates decreases. For further estimations we will use two models:
Model of woman (C=150 \div 500 pF, R= 50 \div 5000 Ω):

Model of man (C=80 \div 300 pF, R= 50 \div 5000 Ω):

$$U_{z\ 100\mu F} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10,5 \cdot 10^{-6} \cdot (7 + (50 \div 5000))}{(80 \div 300) \cdot 10^{-12}}} = 2001,5 \div 36325,0 \approx (2 \div 36,3) [kV]$$

Wyniki obliczeń dla tych modeli, o ile producent nie zadbał o stosowne zabezpieczenia, dobitnie wskazują na niebezpieczeństwo podczas pracy ze spłonkami M-100 i urządzeniami je zawierającymi. Chociaż obliczone skrajne górne wartości napięć zgromadzonych ładunków, umożliwiających detonację spłonki M-100 mogą być niemożliwe do osiągnięcia w praktyce (w okolicach 40 kV nastąpi zjawisko samorozładowania poprzez wyładowania koronowe), to wartości rzędu 1,5 kV są bardzo łatwe do osiągnięcia, a człowiek nie ma świadomości ich obecności, tak jakby to mogło mieć miejsce przy napięciach powyżej 3-4 kV. Wniosek: Podczas pracy z niniejszymi elementami należy bezwzględnie stosować najwyższe standardy bezpieczeństwa.

2.5. Prąd bezpieczny spłonki M-100

Ponieważ jedynym nieniszczącym badaniem sprawności spłonek elektrycznych jest pomiar rezystancji mostka oporowego definiuje się prąd bezpieczny I_b i prąd pomiarowy I_p . Prąd bezpieczny definiowany jest dla nieskończenie długiego czasu przepływu przez mostek oporowy. W praktyce określa się prąd bezpieczny dla czasów np. 5 min i więcej, zapewniających niezadziałanie spłonki. Badania [2] wykazały, że jeśli w ciągu 5 min spłonka nie zadziała to nie zadziała również w dłuższym czasie. Niestety producent podaje parametr No-Fire current: 10 mA dla czasu 10 s i temperatury 21°C. Czas ten jest zbyt krótki i z tego powodu nie można traktować tego parametru jako definicyjnego prądu bezpiecznego. Zalecana wartość prądu pomiarowego przy założeniu ograniczenia czasu pomiaru prądu do 10 s wynosi:

$$I_{p(10\ s)} = 0,1 \cdot I_{b(\text{No-Fire current})} = 0,1 \cdot 10\ mA = 1\ mA$$

Ponieważ energia wydzielana na mostku dla tak małego prądu pomiarowego $I_{p(10\ s)}$ przekłada się na zaledwie 1 % energii prądu

The results of calculations for these models, except the manufacturer has not provided special protecting solutions, indicate explicitly the risk at working with M-100 primers and devices with them. Although the calculated upper limits of voltages for collected charges that could detonate M-100 primer may not be reached in practice (at 40 kV the crown self-discharge happens) the values of 1,5 kV level are possible and people have no consciousness of their presence as it would be for voltages above 3-4 kV. There is obvious conclusion: at working with these primers the highest standards of safety must be observed.

2.5. The safe current of M-100 primer

As the measurement of the bridge resistance is the only way of non-destructive efficiency testing for electric primers then the safe current I_b and measurement current I_p are defined. The safe current is defined for infinitely long flow by the resistance bridge. In practice the safe current is defined for times of e.g. 5 min and more which provide non-action of the primer. The tests have proved [2] that if the primer is not activated after 5 min then it will not work after any longer time. Unfortunately the manufacturer gives only the “no-fire current: 10 mA for time of 10 s and temperature 21°C”. This time is too short and for this reason it cannot be treated to define the safe current. The recommended value of the measurement current at the assumption that the current is applied below 10 s is:

As the energy dissipated in the bridge for such low level of measurement current $I_{p(10\ s)}$ creates only 1 % of safe current en-

bezpiecznego $I_{b(\text{No-Fire current})}$ istnieje duże prawdopodobieństwo bezpiecznego pomiaru w nieograniczonym czasie przy temperaturze spłonki nie odbiegającej od założonej. Wiarygodność tej tezy należy potwierdzić doświadczalnie. Można też doświadczalnie ustalić zgodny z definicją prąd bezpieczny spłonki M-100 I_b , co byłoby najlepszym rozwiązaniem.

3. Podsumowanie

Wyniki obliczeń mogą posłużyć do przygotowania i przeprowadzenia badań laboratoryjnych strzelaniem spłonek M-100 w celu ich dogłębnego poznania, a także do opracowywania współpracujących z nimi układów strzałowych zapalników. Przepływ przez uziemioną spłonekę ładunku elektrycznego przekazanego poprzez dotyk palcem bądź nieizolowanym, metalowym przedmiotem (np. pęsetą) w przypadku typowo naładowanego elektrostatycznie człowieka teoretycznie niesie ryzyko jej detonacji. Znikoma ilość energii potrzebnej do pobudzenia spłonki M-100 i wynikająca z tego teoretycznie duża wrażliwość na elektryczność statyczną (ESD) nakazuje zachowanie szczególnych środków ostrożności w pracach z nimi. Duża wrażliwość elektryczna spłonki nakłada wyższe wymagania na konstrukcje systemów zapalnikowych. Praca wskazuje na potrzebę eksperymentalnego określenia energii zapłonu (impulsu zapłonu). Istnieje również potrzeba określenia długotrwałego prądu bezpiecznego oraz dolnej granicy energii zapłonu (impulsu zapłonu), szczególnie dla wysokich temperatur. Z uwagi na możliwość zabezpieczenia przez producenta spłonek przed wyładowaniami elektrostatycznymi (ESD) celowe wydaje się być przeprowadzanie badań laboratoryjnych określających parametry takiej inicjacji. W przypadku potwierdzenia się przypuszczenia o możliwości popełnienia błędu w danych katalogowych stosowne będzie powiadomienie o tym fakcie producenta.

Literatura / Literature

- [1] Katalog: *M-100 Microdetonator, EaglePicher Detonators and Explosive Leads*, EaglePicher Technologies, LLC

ergy $I_{b(\text{No-Fire current})}$ then there is a great probability of safe measurement in unlimited time at the primer temperature not different than the assumed one. The reliability of this thesis has to be confirmed experimentally. And the best solution is to determine the safe current I_b of the primer M-100 according to definition.

3. Conclusions

The results of measurements may be used to prepare and carry out the laboratory tests by firing M-100 primers in order to get a better knowledge on them and also to develop the fuse firing systems working together with them. The flow of electric charge through the grounded primer caused by a touch of fingers or un-isolated metal object (e.g. pincers) in the case of a human being typically loaded by an electrostatic charge gives theoretical risk of its detonation. The low level of energy needed for the initiation of M-100 primer and the resulting theoretical high level of susceptibility to ESD demands that special safety precautions have to be undertaken at working on them. The high electric sensitivity of the primer imposes the greater requirements on the designs of fuse systems. The paper indicates that there is a need to determine experimentally the energy of ignition (ignition pulse). There is also a need to specify a long term safe current and the low limit of ignition energy (ignition pulse) especially for high temperatures. Regarding a possibility that the manufacturer of primers had applied some means preventing against (ESD) it seems reasonable to carry out some laboratory tests that can establish the characteristics of such initiation. In the case that the assumption about committing an error in catalogue data is confirmed a relevant note shall be issued to the manufacturer.

- [2] Derecki S., Stor E.: *Podstawy projektowania zapalników artyleryjskich*, Wydawnictwo WAT 1983, s. 162, 221
- [3] Krzewiński R., Rekucki R.: *Roboty budowlane przy użyciu materiałów wybuchowych*, Wydawca POLCEN Sp. z o.o. 2005, s. 101
- [4] Nota katalogowa: *ZAPALNIK ELEKTRYCZNY „ERG” (ELECTRIC FUSE ‘ERG’)*, ZTS „ERG-BIERUŃ” S.A.
- [5] Standaryzacja: *ANSI/ESD/JEDEC JS-001-2012*, Edycja 2012
- [6] Standaryzacja: *MIL-STD-883H, Method 3015.8, Electrostatic Discharge Sensitivity Classification*, Edycja 2010
- [7] Zieliński R.: *Wyładowanie elektrostatyczne (ESD) – Mechanizm powstawania i metody zabezpieczenia*, Politechnika Wroclawska, Instytut Telekomunikacji i Akustyki

