

Daniel KOWALAK\*, Kazimierz JAKUBIUK\*, Mikołaj NOWAK\*

## ZASTOSOWANIE WYŁĄCZNIKA BEZPIECZNIKOWEGO DO FORMOWANIA IMPULSU WIELKIEJ MOCY

W wielu układach fizycznych i technicznych konieczne jest wytwarzanie impulsów wielkiej mocy o krótkim czasie trwania (rzędu ułamków  $\mu\text{s}$ ). Impulsy te uzyskuje się stosując układy formujące zasilane ze źródła impulsowego wielkiej mocy, o długim czasie trwania impulsu, rzędu kilkudziesięciu  $\mu\text{s}$ . Jednym z układów formujących jest bezpiecznik wyłącznikowy. W pracy metodą symulacyjną badano wpływ parametrów bezpiecznika wyłącznikowego na parametry formowanego impulsu. Nie uwzględniono wpływu obciążenia układu formującego na parametry impulsu. Uzyskano istotne wskazówki dotyczące projektowania bezpiecznika wyłącznikowego.

SŁOWA KLUCZOWE: bezpiecznik topikowy, procesy komutacyjne, formowanie impulsów wielkiej mocy, symulacje komputerowe w obwodach elektrycznych.

### 1. WPROWADZENIE

W badaniach fizycznych i technicznych zachodzi konieczność wytworzenia impulsów napięcia o wartości rzędu setek kV i czasie trwania rzędu ułamka  $\mu\text{s}$  [2, 3, 4, 6]. Tego rodzaju impulsy mogą być wykorzystane np. jako źródło promieniowania [4, 6]. Bezpośrednie wytworzenie impulsu napięcia o takich parametrach jest problemem złożonym. Dlatego są one często wytwarzane w sposób pośredni. W pierwszej kolejności wytwarza się pierwotny impuls prądowy o wielkiej mocy, rzędu GW, ale o dłuższym czasie trwania, rzędu kilkunastu lub kilkudziesięciu  $\mu\text{s}$ , a następnie formuje się ten impuls poprzez wykorzystanie wyłącznika bezpiecznikowego (ang. fuse opening switch) [1, 4] lub linii Blumleina [4]. Proces formowania impulsu nazywa się również kondycjonowaniem mocy (ang. power conditioning). Pierwotny impuls wytwarza się najczęściej w tzw. generatorach magnetokumulacyjnych [4, 7]. Zasada działania układu formowania impulsu z wykorzystaniem wyłącznika bezpiecznikowego polega na bardzo szybkim wyłączeniu impulsu prądu w obwodzie z indukcyjnością o wartości rzędu  $\mu\text{H}$ , w wyniku czego na indukcyjności powstaje przepięcie – jako impuls napięciowy o bardzo dużej wartości.

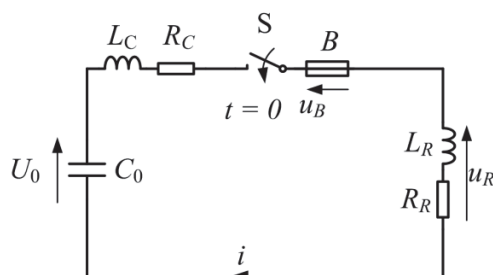
---

\* Politechnika Gdańska

W pracy podano wyniki symulacji działania wyłącznika bezpiecznikowego w układzie probierczym, w którym impuls prądowy wytwarza się poprzez rozładowanie kondensatora impulsowego przez cewkę roboczą o bardzo małej indukcyjności. Celem badań jest dobór przekroju i długości elementów topikowych w bezpieczniku, przyjmując za kryterium uzyskanie maksymalnej wartości przepięcia na gałęzi z indukcyjnością roboczą oraz możliwie najmniejszą stratę energii w bezpieczniku [4]. Analizowano również zależność strat energii w bezpieczniku w czasie wyłączania prądu od jego wymiarów.

## 2. MODEL OBWODOWY UKŁADU PROBIERCZEGO

Analizę wpływu przekroju elementu topikowego na wartość generowanych przepięć w gałęzi roboczej przeprowadzono w układzie probierczym, którego schemat ideowy zamieszczono na rys. 1.



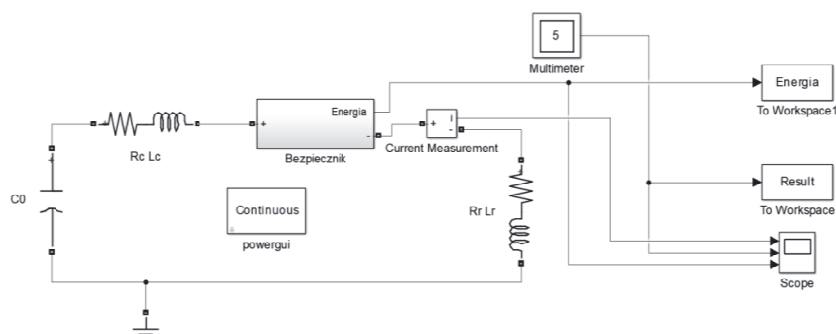
Rys. 1. Schemat układu probierczego do określenia parametrów topika bezpiecznika:  
 $C_0$  – pojemność - źródło zasilania,  $L_C$ ,  $R_C$  – odpowiednio indukcyjność i rezystancja połączeń i źródła, S – łącznik, B – bezpiecznik,  $L_R$ ,  $R_R$  – odpowiednio indukcyjność i rezystancja robocza

Obwód składa się ze źródła napięciowego w formie kondensatora  $C_0$ , naładowanego do napięcia  $U_0$ , elementów obwodu zasilania, które odwzorowano za pomocą rezystancji  $R_C$  i indukcyjności  $L_C$ , łącznika S, bezpiecznika B oraz elementu roboczego o indukcyjności  $L_R$  i rezystancji  $R_R$ . Przyjęte wartości parametrów poszczególnych elementów obwodu probierczego zamieszczono w tabelicy 1.

Tabela 1. Parametry obwodu probierczego.

$C_0$	$U_0$	$L_C$	$R_C$	$L_R$	$R_R$
$\mu\text{F}$	kV	$\mu\text{H}$	$\text{m}\Omega$	$\mu\text{H}$	$\text{m}\Omega$
2,53	13,1	1,0	1,0	3,0	1,136

Obliczenia przeprowadzono w programie Matlab Simulink, w którym odwzorowanie analizowanego schematu podano na rys. 2.



Rys. 2. Aplikacja modelu obwodowego w programie Matlab-Simulink

Bezpiecznik  $B$  odwzorowano w formie sterowanego źródła napięciowego, w którym uzyskiwane napięcie wyrażono w funkcji zmiennej rezystancji  $R_B$  oraz prądu  $i$  płynącego przez bezpiecznik  $B$ . Rezystancja bezpiecznika  $R_B$  jest obliczana z zależności:

$$R_B = \frac{\rho l_f}{S_f} = \frac{4\rho l_f}{\pi d^2} \quad (1)$$

gdzie:  $\rho$  – rezystywność elementu topikowego,  $S_f$ ,  $l_f$ ,  $d$  – odpowiednio przekrój poprzeczny, długość i średnica elementu topikowego bezpiecznika  $B$ .

Z uwagi na zachodzące procesy nagrzewania i rozpadu elementu topikowego w wyniku przepływającego przez niego prądu  $i$ , wartość rezystywności elementu topikowego  $\rho$  uzależniono od miary energii  $h$  odniesionej do przekroju poprzecznego  $S_f$  elementu topikowego bezpiecznika [1, 2, 4]. Zmianę rezystywności elementu topikowego, na podstawie aproksymacji wielu wyników eksperymentalnych, opisano zależnością [4]:

$$\rho(h) = \begin{cases} \rho_0 \left( 1 + A \left( \frac{h}{h_e} \right)^B \right) & \text{dla } h \leq h_e \\ \rho_0 \left( A + e^{C \left( \frac{h-h_e}{h_e} \right)} \right) & \text{dla } h > h_e \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:  $\rho_0$  – rezystywność materiału elementu topikowego w temperaturze  $0^\circ\text{C}$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $h_e$  są stałymi wyznaczonymi na podstawie badań eksperymentalnych [4].

Miarę energii  $h$  odniesioną do przekroju elementu topikowego  $S_f$  obliczono zgodnie ze wzorem:

$$h = \frac{1}{S_f^2} \int_0^{t_0} i(t)^2 dt \quad (3)$$



Tablica 2. Stałe opisujące rezystywność  $\rho$  elementu topikowego bezpiecznika wykonanego ze srebra użyte w obliczeniach [4].

Symbol	Jednostka	Wartość
$\rho_0$	$\Omega\text{m}$	$1,59 \cdot 10^{-9}$
$l_f$	cm	20
$h_e$	$\text{A}^2\text{s/m}^4$	$1,03 \cdot 10^{17}$
$A$	–	36
$B$	–	4,5
$C$	–	100

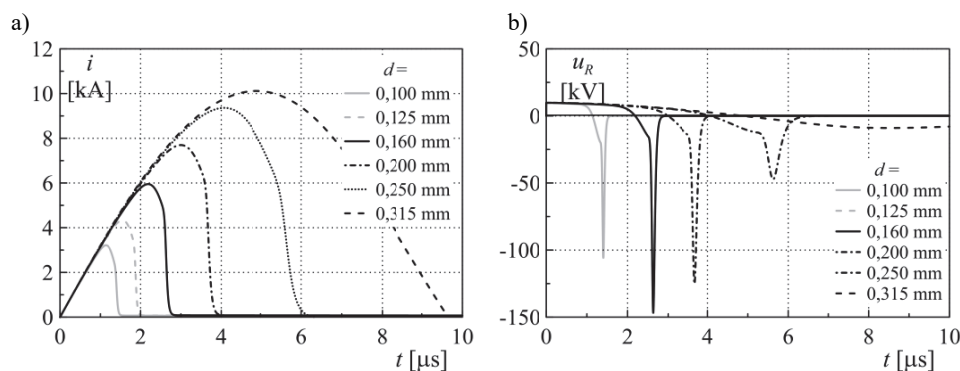
Parametry obwodu probierczego dobrano w taki sposób, aby przy największej analizowanej średnicy  $d$  elementu topikowego uzyskiwać przebieg prądu  $i$  o częstotliwości  $f = 50$  kHz i wartości szczytowej prądu rozładowania kondensatora  $C_0$  wynoszącej 10 kA.

Wyniki obliczeń prądu  $i$  spadku napięcia  $u_R$  na elemencie roboczym  $R_R, L_R$  dla różnych średnic  $d$  elementu topikowego przedstawiono na rys. 4.

W celu optymalizacji średnicy  $d$  elementu topikowego bezpiecznika  $B$  obliczono współczynnik wzmocnienia napięcia  $k_U$  wywołany procesem przerywania prądu  $i$  przez bezpiecznik, który określono wzorem:

$$k_U = \frac{|u_R|_{\max}}{U_0} \quad (5)$$

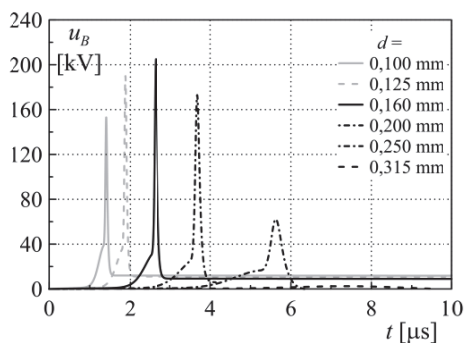
gdzie:  $|u_R|_{\max}$  – maksymalna, bezwzględna wartość przepięcia generowanego na elemencie roboczym  $R_R, L_R$  podczas przerywania prądu rozładowania kondensatora  $C_0$ .



Rys. 4. Przebiegi: a) prądu  $i$ , b) spadku napięcia  $u_R$  na elemencie roboczym  $R_R, L_R$  dla różnych średnic  $d$  elementu topikowego bezpiecznika  $B$

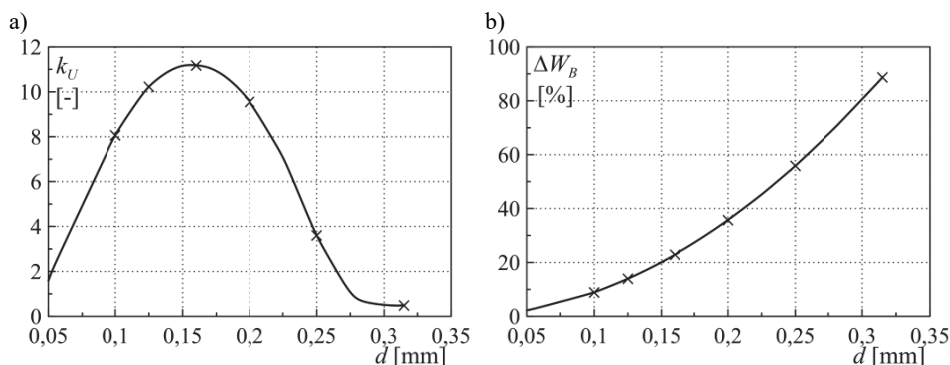


Na rys. 5 zamieszczono wyniki obliczeń spadku napięcia  $u_B$  na bezpieczniku  $B$  o różnych średnicach elementu topikowego  $d$  podczas przerywania prądu rozładowania baterii  $C_0$ .



Rys. 5. Przebiegi spadku napięcia  $u_B$  na bezpieczniku  $B$  dla różnych średnic  $d$  elementu topikowego bezpiecznika  $B$

Wyniki obliczeń współczynnika  $k_U$  w funkcji średnicy elementu topikowego bezpiecznika  $B$  zamieszczono na rys. 6a.



Rys. 6. Zależność: a) współczynnika wzrostu napięcia  $k_U$ , b) względnych strat energii  $\Delta W_B$  w bezpieczniku  $B$  do chwili wyłączenia prądu, w funkcji średnicy elementu topikowego bezpiecznika  $B$

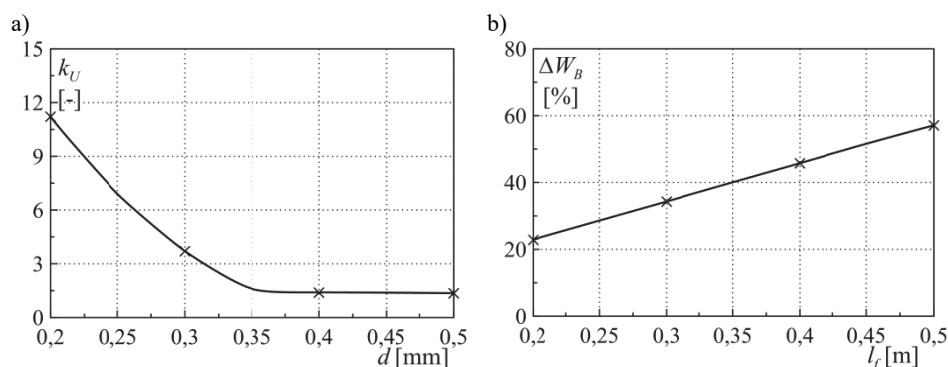
Na rys. 6b zamieszczono zależność względnej straty energii  $\Delta W_B$  w bezpieczniku  $B$  do chwili przerywania prądu, odniesionej do początkowej energii zgromadzonej w naładowanej do napięcia  $U_0$  pojemności  $C_0$ , zgodnie ze wzorem:

$$\Delta W_B = \frac{W_B}{W_0} 100\% = \frac{2W_B}{C_0 U_0^2} 100\% \quad (6)$$

gdzie:  $W_0$  – całkowita energia zgromadzoną w pojemności  $C_0$  naładowanej do napięcia  $U_0$ .

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń określono najkorzystniejszą średnicę  $d = 0,16$  mm elementu topikowego bezpiecznika  $B$ , dla której współczynnik wzmocnienia napięcia wyniósł  $k_U = 11$  ( $|u_R|_{\max} = 147$  kV), przy stracie energii na rozpad bezpiecznika na poziomie 22%, w stosunku do całkowitej energii zgromadzonej w kondensatorze  $C_0$ .

Przeprowadzono również analizę wpływu zmian długości  $l_f$  elementu topikowego bezpiecznika  $B$ , przy zachowaniu stałej średnicy  $d$  wynoszącej 0,16 mm, na współczynnik wzmocnienia napięcia  $k_U$  i względną stratę mocy  $\Delta W_B$  w bezpieczniku  $B$ . Wyniki obliczeń zamieszczono na rys. 7.



Rys. 7. Zależność: a) współczynnika wzmocnienia napięcia  $k_U$ , b) strat energii  $\Delta W_B$  w bezpieczniku  $B$  w funkcji długości  $l_f$  elementu topikowego bezpiecznika  $B$

Jak wynika z rys. 7, biorąc pod uwagę współczynnik wzmocnienia napięcia, korzystne jest stosowanie topików bezpiecznika o możliwie niewielkiej długości. Krótki element topikowy jest również korzystny ze względu na najmniejsze straty energii w bezpieczniku (rys. 7b). Długość topika jest jednak ograniczona z dołu wytrzymałością elektryczną przerwy w bezpieczniku.

#### 4. WNIOSKI

- Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynikają następujące wnioski:
- zastosowanie bezpiecznika wyłącznikowego jest skuteczną metodą formowania impulsu wielkiej mocy. W ten sposób uzyskuje się ponad dziesięciokrotne skrócenie czasu trwania impulsu, przy jednoczesnym, ponad dziesięciokrotnym zwiększeniu wartości maksymalnej napięcia impulsu, w badaniach nie uwzględniono parametrów odbiornika,
  - wadą badanego układu jest znaczna strata energii w bezpieczniku, obniżająca sprawność energetyczną procesu formowania impulsu,



- z punktu widzenia współczynnika wzmocnienia napięcia istnieje najkorzystniejszy przekrój topika bezpiecznika; dane z literatury przedmiotu, wskazują, że przekrój nie może być zbyt mały, gdyż uniemożliwia to optymalnego wykorzystania energii zgromadzonej w źródle zasilającym,
- długość topika bezpiecznika powinna być jak najmniejsza; jednak długość ta nie może być zbyt mała ze względu na ograniczoną wytrzymałość elektryczną przerwy powstałej po rozpadzie topika oraz izolacji korpusu bezpiecznika.

*Badania wykonano w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – nr umowy DOB-1-1/1/PS/2014*

## LITERATURA

- [1] Kristiansen M., Electro-Explosive Switches for Helical Flux Compression Generators. in Proc. of Megagauss Conference, 2006.
- [2] McCauley D., et. al., Electro-explosive Fuse Optimization for Helical Flux Compression Generator using a Non-explosive Test Bed. IEEE Trans. on Plasma Science, p. 1018-1021, 2007.
- [3] Motyl E, i in., Generator nanosekundowych impulsów wysokiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny, s. 170-173, 1k/2006.
- [4] Neuber A., A., Explosively Driven Pulsed Power. Helical Magnetic Flux Compression Generators. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2005.
- [5] Reinovsky R., E., Fuse opening switch for pulse power applications. Opening Switches. In: Guenther A., Kristiansen M. (eds): Opening switches, advances in pulsed power technology. vol. 1, Plenum Press, New York, London, 1987.
- [6] Reinovsky R., E., High Voltage Power Conditioning Systems Powered Flux Compression Generators. Proc. of the 7th IEEE Pulsed Power Conf., p 971, 1989.
- [7] Wołoszyn M., et. al., Comparative Analysis of Coaxial Magnetocumulative Generators. Archives of Electrical Engineering, vol. 66, pp. 681-692, 2017.

## APPLICATION OF FUSE OPENING SWITCHES FOR CONDITIONING HIGH POWER PULSES

In many physical and technical systems producing high-power pulses of short duration (i.e. the order of magnitude of tenths parts  $\mu\text{s}$ ) is necessary. These pulses are obtained by using forming systems supplied from a high-power pulsed source with a long pulse duration of several dozen  $\mu\text{s}$ . One of the forming systems is a fuse opening switch. In this article the influence of the fuse parameters on the parameters of the formed pulse was investigated with the use of the simulation method. The impact of load forming system on the pulse parameters is not taken into account. Important recommendations for designing the fuse opening switches were acquired.

*(Received: 18.02.2018, revised: 10.03.2018)*

