

doi:10.15199/48.2020.02.02

## Modelowanie bezpiecznika rozłącznikowego w układach formowania impulsów wielkiej mocy

**Streszczenie.** Problem modelowania bezpieczników o dużej dynamice wyłączenia prądu jest zagadnieniem szeroko opisywanym w literaturze. Układy takie mogą być wykorzystane w szczególności do formowania impulsów wysokiego napięcia o wartościach rzędu setek kV, charakteryzujących się czasem trwania rzędu ułamka  $\mu$ s. W niniejszej pracy przedstawiono empiryczny model bezpiecznika wielotopikowego, rozszerzony w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych.

**Abstract.** The problem of modeling fuse systems with high dynamics of current switching is an issue widely described in the literature. Such systems can be used in particular to form high voltage pulses with values of hundreds of kV characterised by the duration of a fraction of  $\mu$ s. This paper presents an empirical model of a multi-wire fuse opening switch, extended on the basis of experimental results. (The modeling of fuse opening switch in high-powered pulse formation circuit).

**Słowa kluczowe:** bezpieczniki topikowe, modelowanie obwodowe, układ formowania impulsu wielkiej mocy, procesy komutacyjne.

**Keywords:** fuse switch, circuit modeling, high-power pulse-forming circuit, commutation processes.

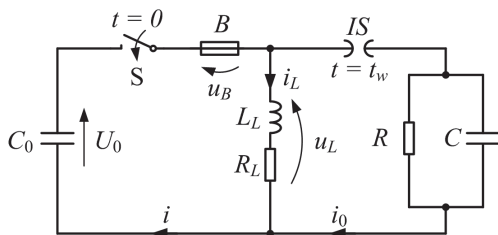
### Wstęp

W wielu układach wielkiej mocy zachodzi konieczność wytworzenia impulsów napięcia o wartości rzędu setek kV i czasie trwania rzędu ułamka  $\mu$ s [1, 2, 3], wykorzystywanych np. jako źródło promieniowania elektromagnetycznego [2, 3]. W rzeczywistych układach tego rodzaju impulsy wytwarza się najczęściej w sposób pośredni (rys.1), poprzez formowanie impulsu o dłuższym czasie trwania, rzędu wielu  $\mu$ s. W tym celu często wykorzystuje się bezpieczniki rozłącznikowe [1, 2, 3] lub linię Blumleina [2].



Rys. 1. Schemat blokowy przedstawiający ideę układu formowania impulsów

Pierwotny impuls może być wytworzony np. w generatorach magnetokumulacyjnych (FCG) [2, 4]. Formowanie impulsu z wykorzystaniem bezpiecznika rozłącznikowego polega na bardzo szybkim przełączeniu prądu z jednej gałęzi układu do innej, stanowiącej obciążenie (rys. 2).

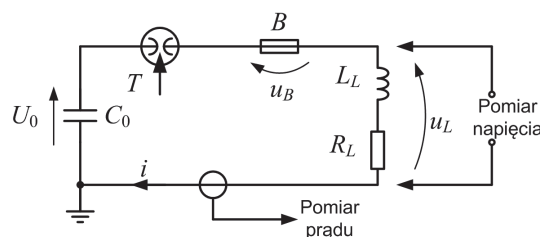


Rys.2. Schemat ideowy układu formowania impulsów przez bezpiecznik rozłącznikowy:  $C_0$  – źródło energii o napięciu początkowym  $U_0$ ,  $S$  – łącznik,  $B$  – bezpiecznik,  $L_L$ ,  $R_L$  – indukcyjność i rezystancja robocza,  $C$ ,  $R$  – pojemność i rezystancja obciążenia

Opis działania bezpiecznika rozłącznikowego przedstawiono w pracach [1, 2, 3]. Celem niniejszych badań jest modyfikacja modelu numerycznego bezpiecznika rozłącznikowego umożliwiającego dobór parametrów technicznych rzeczywistego bezpiecznika zapewniającego formowanie impulsu o ściśle założonych parametrach. Wyniki symulacji komputerowych zweryfikowano w ramach badań eksperymentalnych bezpieczników rozłącznikowych w układzie syntetycznym.

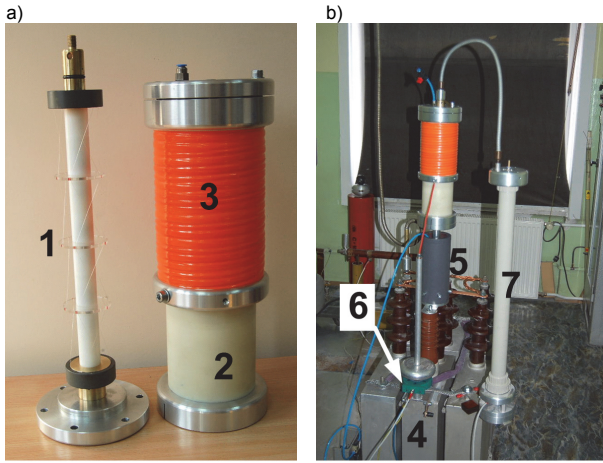
### Badania laboratoryjne wielotopikowych bezpieczników rozłącznikowych

Badania procesów wyłączenia prądu przez model bezpiecznika, jako elementu przerywającego prąd z dużą stromością przeprowadzono w syntetycznym układzie probierczym, którego schemat ideowy przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska probierczego do badań procesów przerywania prądu przez model bezpiecznika w układzie formowania impulsów:  $C_0$  – bateria kondensatorów;  $T$  – trygatron;  $B$  – model bezpiecznika;  $L_L$ ,  $R_L$  – indukcyjność i rezystancja cewki roboczej

Układ probierczy składa się ze źródła energii w postaci baterii kondensatorów  $C_0$  o pojemności 0,96  $\mu$ F, naładowanej do napięcia  $U_0 = 60$  kV, szeregowo połączonych elementów obwodu, tj.: trygatronu  $T$  – pełniącego rolę załącznika, cewki powietrznej o indukcyjności  $L_L = 3$   $\mu$ H i rezystancji  $R_L = 10$  m $\Omega$ , będącej obciążeniem bezpiecznika  $B$ , w którym jako element topikowy zastosowano srebrny drut lub druty o średnicy 0,125 mm i długości  $l = 37$  cm umieszczone osiowo. Element lub elementy topikowe nawijano skrętnie na izolacyjnym stelażu wykonanym w formie krążków o średnicy 60 mm z podziałką wynoszącą 30 cm (rys. 4), w ten sposób, że na całą długość bezpiecznika przypadają jeden obrót elementu topikowego wzdłuż izolacyjnego karkasu stanowiącego konstrukcję mocującą. Jako ośrodek gaszenia łuku wykorzystano azot o ciśnieniu około 4 atmosfer. Przeprowadzone badania nie wykazały wyraźnego wpływu kierunku nawinięcia elementów topikowych względem uzwojenia cewki  $L_L$ . W związku z tym nie uwzględniano kierunku nawinięcia elementów topikowych względem kierunku nawinięcia indukcyjności  $L_L$ , która była zainstalowana osiowo na obudowie bezpiecznika. Jednakże kierunek nawinięcia każdego modelu bezpiecznika był identyczny. Widok modelu bezpiecznika i stanowiska probierczego przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Widok: a) modelu bezpiecznika  $B$  i znajdującej się w korpusie modelu cewki roboczej, b) stanowiska probierczego do badań procesów przerywania prądu: 1 – stelaż izolacyjny z elementami topikowymi, 2 – korpus bezpiecznika, 3 – cewka obciążenia, 4 – bateria kondensatorów, 5 – trygatron, 6 – przetwornik prądu, 7 – przetwornik napięcia

Badania obejmowały sprawdzenie procesu przerywania prądu rozładowania baterii kondensatorów  $C_0$  oscylacyjnie gasnącego o częstotliwości około 93 kHz i amplitudzie około 30 kA. Prąd przerywany przez bezpieczniki zbudowane z różnej liczby elementów topikowych powodował generację impulsu napięciowego na gałęzi obciążenia  $R_L, L_L$ . Badania eksperymentalne składały się z dwóch etapów. W pierwszej próbie dokonywano rejestracji prądu płynącego przez bezpiecznik  $B$  oraz napięcia na jego zaciskach, w celu określenia parametrów fizycznych związanych z procesem przerywania prądu przez sam bezpiecznik. Następnie, w celu weryfikacji skuteczności generacji impulsu napięciowego na gałęzi obciążenia  $R_L, L_L$ , wykonywano próbę działania bezpiecznika o tych samych parametrach, podczas której rejestrowano przebieg napięcia na obciążeniu (rys. 3).

### Model numeryczny bezpiecznika

Bezpiecznik  $B$  modelowano jako nieliniową rezystancję, której przebieg uzależniony jest od parametrów konstrukcyjnych bezpiecznika, tj. długości  $l$  oraz przekroju poprzecznego pojedynczego elementu topikowego  $S_0$  i ich liczby  $n$ , jak również od przebiegu płynącego przez nią prądu  $i$ . Wypadkową rezystancję bezpiecznika obliczano z zależności:

$$(1) \quad R_B = \frac{\rho l}{n S_0} = \frac{4 \rho l}{\pi n d^2}$$

gdzie:  $\rho$  – zmienna rezystywność materiału topika,  $S_0$  – przekrój poprzeczny pojedynczego elementu topikowego,  $n$  – liczba elementów topikowych,  $d$  – średnica pojedynczego elementu topikowego.

Z uwagi na zachodzące procesy nagrzewania i rozpadu elementu topikowego w wyniku przepływającego przez niego prądu, rezystywność elementu topikowego  $\rho$  początkowo uzależniono od wartości zmiennej w funkcji miary energii (całki Joule'a) odniesionej do przekroju poprzecznego elementu topikowego na podstawie [5] według wzoru:

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

gdzie:  $\rho_0$  – rezystywność materiału topika w warunkach standardowych,  $A, B, C$  – stałe dobrane w oparciu o badania eksperymentalne podane w [3, 5],  $h_e$  – całka przedłukowa pojedynczego topika odniesiona do kwadratu przekroju topika wyznaczona eksperymentalnie [4].

Miarę energii  $h(t)$  wydzielonej w bezpieczniku, odniesioną do przekroju pojedynczego elementu topikowego  $S_0$  i liczby topików  $n$  obliczono zgodnie ze wzorem:

$$(3) \quad h(t) = \frac{1}{n^2 \cdot S_0^2} \int_0^t i(t')^2 dt',$$

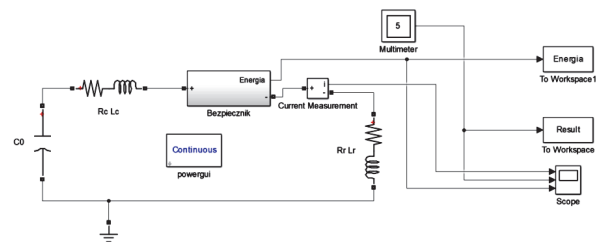
gdzie:  $i(t')$  – przebieg prądu wyłączanego przez bezpiecznik.

W trakcie badań eksperymentalnych stwierdzono znaczny wpływ zmiennej w czasie rezystancji bezpiecznika na kształt wyłączanego prądu, w związku z tym dokonano modyfikacji modelu (2), do postaci opisanej zależnością:

$$(4) \quad \rho(h) = \begin{cases} \rho_0 \left( 1 + D_0 \left( \frac{S_0}{n \cdot S_0} \right)^K \cdot h(t) + A \left( \frac{h(t)}{h_e} \right)^B \right) & \text{dla } h(t) \leq h_e \\ \rho_0 \left( A + D_0 \left( \frac{S_0}{n \cdot S_0} \right)^K \cdot h(t) + e^{C \left( \frac{h(t)-h_e}{h_e} \right)} \right) & \text{dla } h(t) > h_e \end{cases},$$

gdzie:  $D_0 = 6,8 \cdot 10^{-10}$  – współczynnik przyrostu temperaturowego rezystywności materiału topika;  $n, S_0$  – odpowiednio liczba topików i przekrój pojedynczego topika,  $K = 0,7$  – współczynnik wyznaczony w oparciu o badania eksperymentalne.

Obliczenia przeprowadzono w programie Matlab Simulink, w którym odwzorowanie analizowanego schematu podano na rys. 5.



Rys. 5. Aplikacja modelu obwodowego w programie Matlab Simulink [3]

Aplikację modelu bezpiecznika  $B$  w programie Matlab Simulink zamieszczono na rys. 6. Model bezpiecznika  $B$  dodatkowo umożliwia obliczenie energii  $W_B$  traconej na rozpad elementu topikowego. Wartość energii  $W_B$  obliczono, zgodnie ze wzorem:

$$(5) \quad W_B = \int_0^{t_w} i(t)^2 R_B dt$$

gdzie:  $t_w$  – czas wyłączenia prądu  $i$  przez bezpiecznik  $B$ .

Tabela 1. Maksymalne wartości prądu i napięcia zmierzone i otrzymane z symulacji dla różnej liczby topików

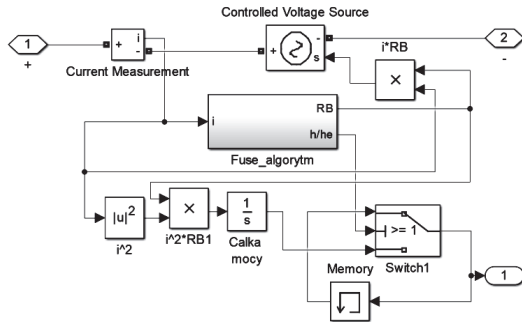
| Liczba topików | Prąd ograniczony [kA] |       | Napięcie na obciążeniu $R_L, L_L$ [kV] |       |
|----------------|-----------------------|-------|--|-------|
|                | pomiar                | model | pomiar                                 | model |
| 1              | 7,6                   | 7,4   | -224                                   | -222  |
| 2              | 12,5                  | 12,4  | -282                                   | -279  |
| 4              | 19,6                  | 19,1  | -303                                   | -312  |
| 6              | 23,8                  | 23,5  | -347                                   | -351  |

Dla weryfikacji zaproponowanego modelu wykonano obliczenia symulacyjne dla układu o tych samym

parametrach. Zestawienie wyników eksperymentalnych i obliczeń zamieszczono w tabeli 1 i w tabeli 2.

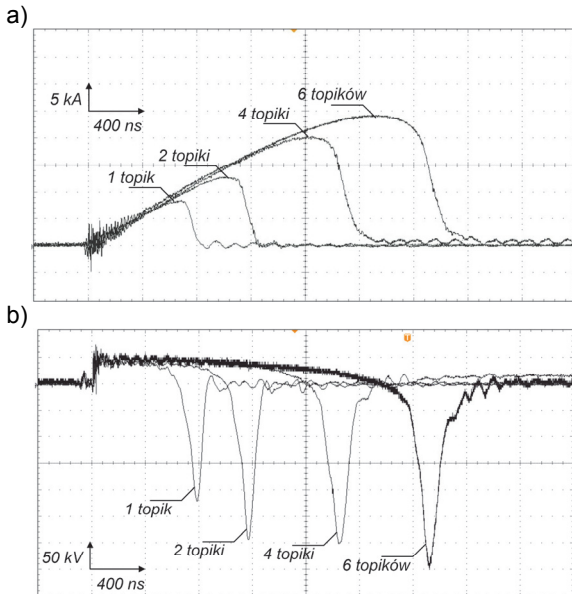
Tabela 2. Zmierzone maksymalne wartości stromości sprowadzania prądu i całki Joule'a przedłukowe dla różnej liczby topików

| Liczba topików | Maksymalna stromość sprowadzania prądu $di/dt$ [kA/ $\mu$ s] |       | Całka Joule'a przedłukowa [ $A^2s$ ] |       |
|----------------|--|-------|--------------------------------------|-------|
|                | pomiar   | model | pomiar                               | model |
| 1              | 85   | 81    | 22                                   | 21    |
| 2              | 94   | 84    | 81                                   | 80    |
| 4              | 84   | 85    | 333                                  | 330   |
| 6              | 74   | 89    | 740                                  | 721   |

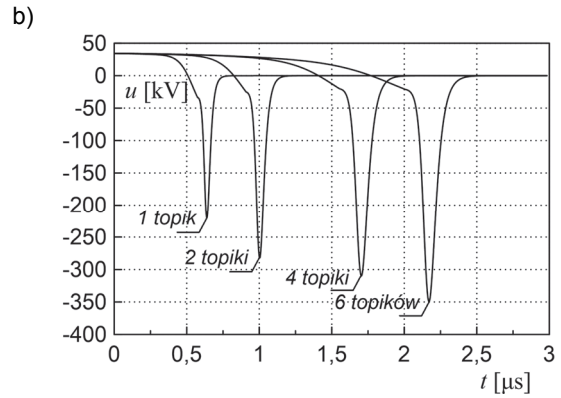
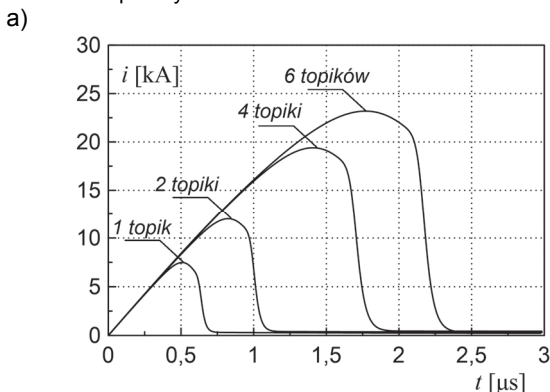


Rys. 6. Model bezpiecznika w aplikacji Matlab-Simulink [3]

Porównanie wyników eksperymentalnych i symulacji w postaci przebiegów prądów i napięć przedstawiono odpowiednio na rys. 7 i rys. 8.

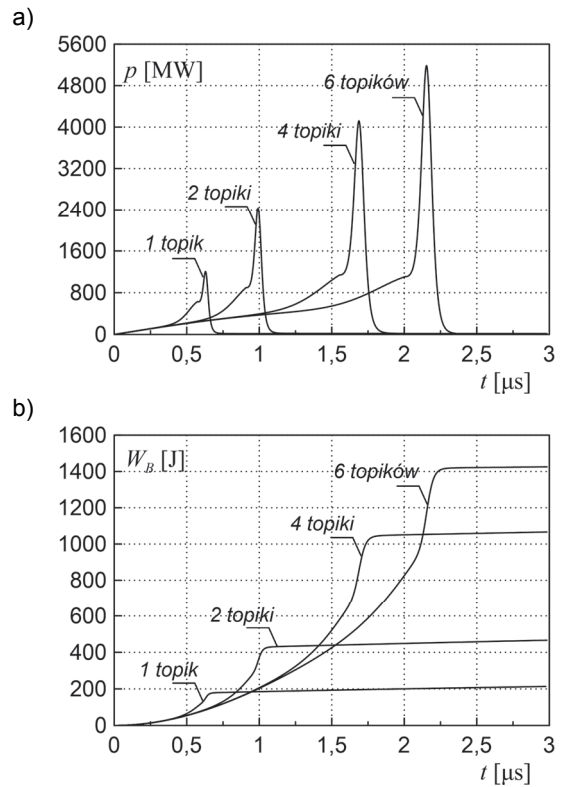


Rys. 7. Zestawienie wyników pomiarów prądów a) i napięć b) na obciążeniu w trakcie działania bezpiecznika dla różnej liczby elementów topikowych



Rys. 8. Zestawienie wyników obliczeń prądów a) i napięć b) na obciążeniu w trakcie działania bezpiecznika dla różnej liczby elementów topikowych

Na rys. 9. przedstawiono obliczone na podstawie modelu przebiegi mocy chwilowych oraz energii wydzielonych w bezpieczniku dla różnej liczby elementów topikowych.



Rys. 9. Zestawienie wyników obliczeń mocy a) oraz energii b) wydzielonych w bezpieczniku w trakcie jego działania dla różnej liczby elementów topikowych

Tabela 3. Obliczone oraz zmierzone wartości szczytowej mocy oraz względne energie wydzielone w bezpieczniku w stosunku do energii początkowej baterii kondensatorów dla różnej liczby elementów topikowych

| Liczba topików | Wartość szczytowa mocy chwilowej wydzielanej w bezpieczniku [MW] |       | Stosunek energii wydzielonej w bezpieczniku w czasie przedłukowym do energii początkowej zmagazynowanej w baterii kondensatorów |       |
|----------------|--|-------|---|-------|
|                | pomiar   | model | pomiar  | model |
| 1              | 1100   | 1216  | 0,13  | 0,103 |
| 2              | 2290   | 2432  | 0,28  | 0,247 |
| 4              | 3860   | 4121  | 0,64  | 0,604 |
| 6              | 5370   | 5186  | 0,87  | 0,820 |

W tabeli 3 zestawiono wartości szczytowe mocy wydzielanej w bezpieczniku podczas jego działania oraz wartości względne energii wydzielanej w bezpieczniku w czasie przedłukowym w odniesieniu do wartości początkowej energii zgromadzonej w baterii kondensatorów ( $W_{C0} = 1730$  J) obliczone numerycznie oraz estymowane na podstawie pomiarów laboratoryjnych. Zestawienie sporządzono dla różnej liczby elementów topikowych.

### Wnioski

Po zmodyfikowaniu modelu zmienności rezystywności topika (4) o składnik liniowo zależny od całki Joule'a uzyskano zadowalającą zgodność wyników pomiarów oraz symulacji. Zaproponowany model uwzględnia wpływ dynamicznie zmieniającej się rezystywności elementu topikowego bezpiecznika w wyniku jego nagrzewania w czasie przedłukowym, co z kolei przekłada się na ograniczenie prądu wyłączanego względem spodziewanej jego wartości.

Opracowana modyfikacja modelu rezystywności umożliwia wykonanie bardziej dokładnych symulacji i w efekcie bardziej dokładny dobór parametrów bezpiecznika rozłącznikowego w rzeczywistym układzie formowania impulsu.

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

**Autorzy:** dr inż. Daniel Kowalak, E-mail: daniel.kowalak@pg.edu.pl, mgr inż. Mikołaj Nowak, E-mail: mikołaj.nowak@pg.edu.pl, dr hab. inż. Mirosław Wołoszyn, prof. PG, E-mail: mirosław.woloszyn@pg.edu.pl, prof. dr hab. inż. Kazimierz Jakubiuk, E-mail: kazimierz.jakubiuk.pg.edu.pl. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk.

### LITERATURA

- [1] Jakubiuk K., Kowalak D.: Formowanie impulsu wielkiej mocy przy pomocy bezpiecznika wyłącznikowego. *Conf. on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory XLI SPETO 2018*, 45-46, 2018
- [2] Jakubiuk K., Kowalak D., Nowak M.: The forming and emission of high Power electromagnetic pulses. *ITM Web of Conferences 19*, 2018.
- [3] Kowalak D., Jakubiuk K., Nowak M.: Zastosowanie wyłącznika bezpiecznikowego do formowania impulsu wielkiej mocy. *Pozn. Univ. Technol. Acad. J. Electr. Eng.* 93, 291-298, 2018..
- [4] McCauley D., Beltet D., Mankowski J., Dickensal J., Neuber A., Kristiansen M.: Electro-explosive Fuse Optimization for Helical Flux Compression Generator using a Non-explosive Test Bed. *IEEE Trans. on Plasma Science*, p. 1018-1021, 2007.
- [5] Motyl E., Dopierała D., Solarek R.: Generator nanosekundowych impulsów wysokiego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny*, s. 170-173, 1k/2006.
- [6] Neuber A.: Explosively Driven Pulsed Power. Helical Magnetic Flux Compression Generators. *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, 2005.
- [7] Reinovsky R., E.: *Fuse opening switch for pulse power applications. Opening Switches*. In: *Opening switches, advances in pulsed power technology*. vol. 1, Plenum Press, New York, London, 1987.