

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

## OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW OBCIĄŻENIA GENERATORA MAGNETOKUMULACYJNEGO

W pracy przedstawiono wyniki symulacji komputerowej generatora magnetokumulacyjnego (GM) obciążonego cewką indukcyjną. Badania symulacyjne przeprowadzono w celu optymalizacji parametrów cewki obciążenia generatora dla wybranej konstrukcji modelu GM. Badano wpływ indukcyjności i rezystancji obciążenia na współczynnik wzmocnienia prądu w układzie oraz na energię pola magnetycznego zgromadzoną w obciążeniu.

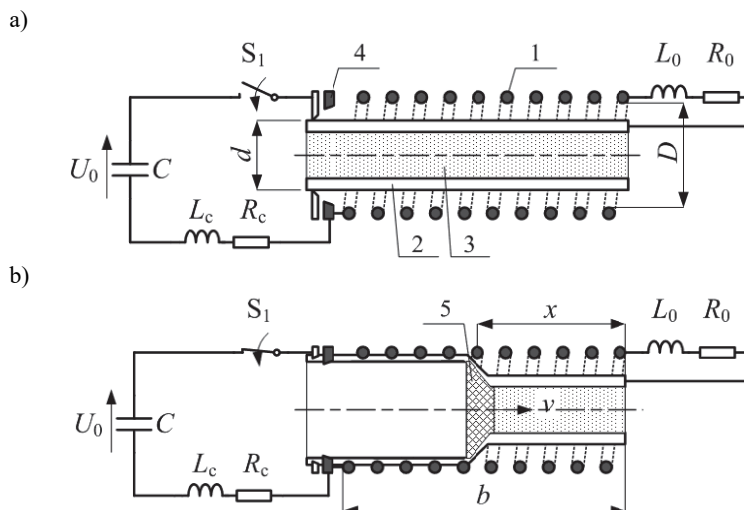
SŁOWA KLUCZOWE: generator magnetokumulacyjny, formowanie impulsów wielkiej mocy, symulacje komputerowe w obwodach elektrycznych.

### 1. WPROWADZENIE

Do realizacji wielu badań o charakterze naukowym i technicznym konieczne jest wytworzenie udarów prądowych o bardzo dużej wartości maksymalnej (rzędu MA) i bardzo krótkim czasie narastania (rzędu  $\mu\text{s}$ ) w obciążeniu o charakterze indukcyjnym (cewce indukcyjnej). Tego rodzaju udary prądowe najczęściej wytwarza się w tzw. generatorach magnetokumulacyjnych (GM) [1, 2]. Idea działania GM (rys. 1), polega na tym, że w wyniku przepływu prądu o wartości rzędu kA ze źródła pierwotnego, np. baterii kondensatorów  $C$  przez odpowiednio ukształtowany układ przewodów wytwarzane jest pole magnetyczne. W chwili, gdy wartość prądu ze źródła pierwotnego osiąga w przybliżeniu wartość maksymalną następuje zainicjowanie wybuchu materiału umieszczonego w układzie przewodów, przy jednoczesnym zwarceniu zacisków wejściowych. Wybuch powoduje zmniejszenie przestrzeni pomiędzy przewodami i kompresję pola magnetycznego. W efekcie kompresji indukcja pola magnetycznego ulega gwałtownemu zwiększeniu, nawet do wartości rzędu dziesiątek T, a prąd narasta do wartości rzędu MA [1, 2, 3]. Pomimo, że jedynie kilka procent energii zgromadzonej w materiale wybuchowym zamienia się w energię pola elektromagnetycznego, to ogromna gęstość tej energii daje pożądany efekt [1].

---

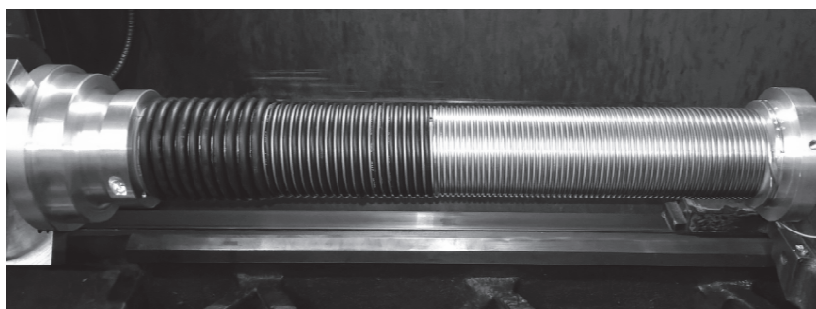
\* Politechnika Gdańska



Rys. 1. Schemat ideowy działania generatora magnetokumulacyjnego: a) stan początkowy układu, b) kompresja pola magnetycznego wywołana procesem rozpękania twornika, 1 – uzwojenie generatora, 2 – twornik, 3 – materiał wybuchowy, 4 – łącznik (ang. crowbar), 5 – fala detonacyjna wywołana materiałem wybuchowym,  $C$  – bateria kondensatorów naładowana do napięcia  $U_0$ ,  $L_c$ ,  $R_c$  – indukcyjność, rezystancja połączeń,  $L_0$ ,  $R_0$  – indukcyjność i rezystancja cewki obciążenia,  $b$  – całkowita długość cewki generatora,  $x$  – efektywna długość cewki generatora w trakcie procesu generacji  $d$  – zewnętrzna średnica twornika,  $D$  – wewnętrzna średnica uzwojenia

## 2. OGÓLNY OPIS MODELU GENERATORA

Przedmiotem analizy optymalizacyjnej są parametry cewki stanowiącej obciążenie modelu GM. Widok poszczególnych sekcji uzwojenia cewki wzbudzenia modelu generatora FCG przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Widok wielosekcyjnej cewki modelu generatora magnetokumulacyjnego

Uzwojenie składa się z trzech sekcji połączonych szeregowo, nawiniętych drutem o średnicy kolejno: 2,6 mm składających się z 60 zwojów – pierwsza sekcja, 3,5 mm i 20 zwojów – druga sekcja, 6,0 mm i 10 zwojów – trzecia

sekcja. Sekcja druga i trzecia posiadają dodatkową izolację w celu zwiększenia wytrzymałości elektrycznej międzyzwojowej modelu GM. Szczegółowe parametry cewki modelu generatora zamieszczono w tablicy 1.

Zmierzona wartość indukcyjności cewki bez twornika wyniosła 71,7  $\mu\text{H}$ . W przypadku umieszczenia wewnątrz cewki aluminiowego twornika zmalała do wartości 59,3  $\mu\text{H}$  (dla częstotliwości  $f = 2 \text{ kHz}$ ).

Tablica 1. Parametry poszczególnych sekcji cewki analizowanego GM.

Sekcja	Liczba zwojów cewki	Średnica drutu	Średnica wewnętrzna uzwojenia	Długość sekcji
–	[zwoje]	[mm]	[mm]	[mm]
1	60	2,6	60	224
2	20	3,5	60	111
3	10	6,0	60	80

W celu doboru parametrów cewki obciążenia opracowano model numeryczny GM, w którym indukcyjność uzwojenia wzbudzenia generatora magnetokumulacyjnego obliczono z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W obliczeniach połowych przyjęto zwoje cewki twornika bez poskoku. Wykonano obliczenia indukcyjności GM dla różnych długości cewek w trzech sekcjach (różna liczba zwojów), na podstawie których otrzymano charakterystykę indukcyjności w funkcji długości twornika.

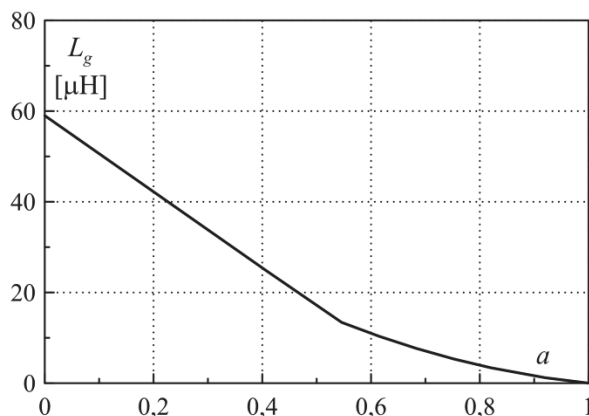
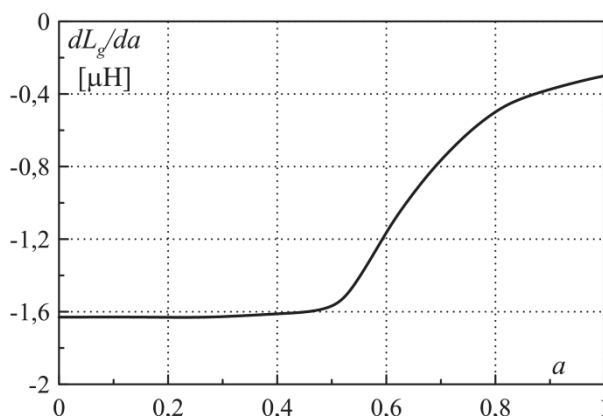
Na rys. 3 pokazano charakterystykę indukcyjności generatora w funkcji bezwymiarowej długości  $a$  generatora, którą wyznaczono, zgodnie z zależnością:

$$a = \frac{b-x}{b} \quad (1)$$

gdzie:  $b$  – całkowita długość cewki generatora,  $x$  – efektywna długość cewki generatora w trakcie procesu generacji prądu (rozpęczniania twornika), zmieniająca się w czasie w przedziale  $x \in \langle b, 0 \rangle$ .

Z rys. 3 wynika, że indukcyjność cewki  $L_g$  zmienia się w trzech sekcjach generatora w przybliżeniu liniowo w funkcji bezwymiarowej efektywnej długości uzwojenia  $a$ . Na rys. 4 pokazano przyrosty indukcyjności w funkcji bezwymiarowej długości  $a$  generatora.



Rys. 3. Zależność indukcyjności generatora w funkcji bezwymiarowej długości  $a$  uzwojeniaRys. 4. Pochodna indukcyjności generatora w funkcji bezwymiarowej długości  $a$  uzwojenia

Zmiana wartości indukcyjności cewki  $L_g$  GM występuje podczas procesu detonacji materiału wybuchowego w tworniku, w wyniku zwarcia poszczególnych zwojów cewki. Przy stałej prędkości zwierania zwojów pochodna zmian indukcyjności cewki w czasie ma ten sam przebieg, jak na rys. 5 z tym, że na osi odciętych czas zmienia się wg zależności:

$$t = \frac{ab}{v} \quad (2)$$

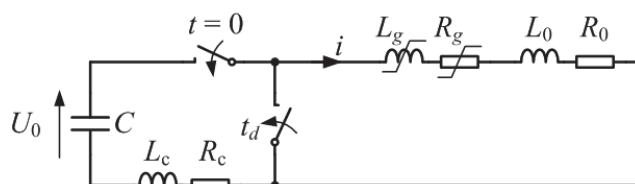
gdzie:  $v$  – prędkość zwierania zwojów cewki, wywołaną składową wzdłużną prędkości propagacji fali detonacyjnej w materiale wybuchowym.

W ramach badań opracowano komputerowy program w celu przeprowadzenia symulacji prądu generatora obciążonego tzw. cewką obciążenia. W badaniach numerycznych wykonano obliczenia dla różnych wartości indukcyjności cewki obciążenia  $L_0$  oraz jej rezystancji  $R_0$ .

W ramach badań eksperymentalnych stwierdzono, że prędkość zwierania zwojów cewki generatora jest równa składowej wzdłużnej fali detomacyjnej materiału wybuchowego [4, 5]. Ze względu na stałą prędkość  $v$  zwierania zwojów cewki generatora, zmianę indukcyjności generatora  $L_g$  w czasie można wyznaczyć ze wzoru:

$$\frac{dL_g}{dt} = \frac{dL_g}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dL_g}{dx} v \quad (3)$$

Obliczenia symulacyjne generacji prądu w GM przeprowadzono w obwodzie jak na rys. 5.



Rys. 5. Schemat obwodowy układu z generatorem magnetokumulacyjnym

Poczynając od chwili  $t = 0$  s kondensator  $C$  rozładowuje się w układzie z GM, reprezentowanym jako szeregowe połączenie GM o indukcyjności  $L_g$  i rezystancji  $R_g$  z cewką obciążenia o indukcyjności  $L_0$  i rezystancji  $R_0$ . W chwili  $t_d$  rozpoczyna się proces wybuchu, który powoduje deformację twornika i w pierwszej fazie zwiera kondensator  $C$  oraz początek generatora  $L_g, R_g$  z cewką obciążenia  $L_0, R_0$ . W wyniku deformacji twornika następuje kompresja („ściskanie”) pola magnetycznego, co wywołuje wzrost prądu generatora [3]. Wartość prądu generowanego podczas kompresji pola w uzwojeniu generatora i w obciążeniu obliczono na podstawie równania:

$$i \frac{dL_g}{dx} v + (L_g + L_0) \frac{di}{dt} + i(R_g + R_0) = 0 \quad (4)$$

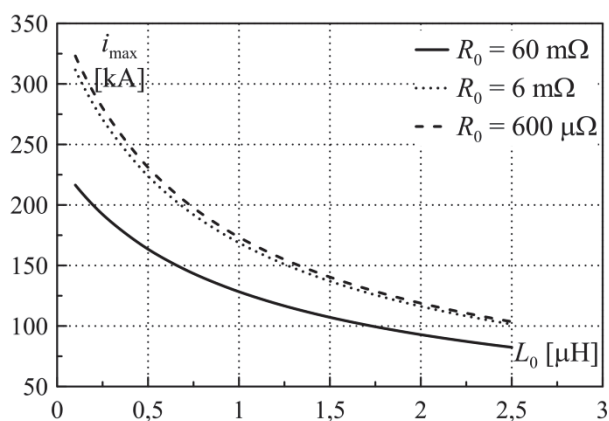
Nieliniowe równanie różniczkowe (4) rozwiązane zostało metodą numeryczną.

### 3. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

W przygotowanym modelu obliczeniowym przeprowadzono symulacje komputerowe, których celem było określenie wpływu parametrów obciążenia GM, tj. indukcyjności  $L_0$  oraz rezystancji  $R_0$ , na maksymalne wartości generowanych prądów, współczynnik wzmocnienia prądu w układzie  $k$  oraz ilość energii pola magnetycznego  $E$  zgromadzonej w cewce obciążenia. Analizę przeprowadzono dla indukcyjności  $L_0$  zmieniających się w przedziale  $0,2 \div 2,5 \mu\text{H}$  i dla trzech wartości rezystancji cewki obciążenia  $R_0$ , równych  $0,6; 6$  oraz  $60 \text{ m}\Omega$ .

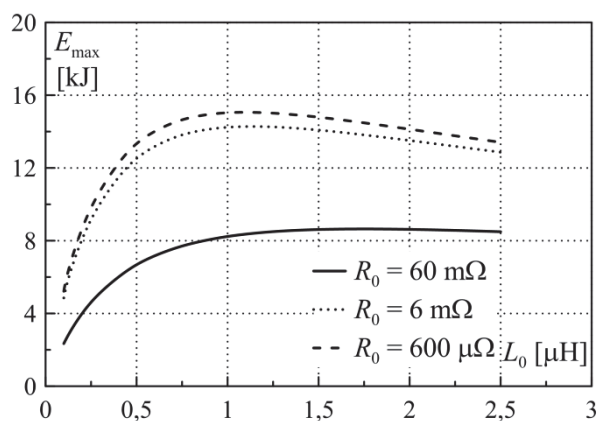


Na rys. 6 pokazano zależność maksymalnej wartości generowanego prądu  $i_{\max}$  w układzie w zależności od indukcyjności  $L_0$  oraz dla trzech wartości rezystancji obciążenia  $R_0$ .



Rys. 6. Zależność maksymalnej wartości generowanego prądu w układzie w zależności od indukcyjności obciążenia  $L_0$  dla trzech wartości rezystancji cewki obciążenia  $R_0$

Na rys. 7 przedstawiono zależność maksymalnej energii pola magnetycznego  $E_{\max}$  zgromadzonej w cewce obciążenia  $L_0$  dla trzech wartości rezystancji cewki obciążenia  $R_0$ .

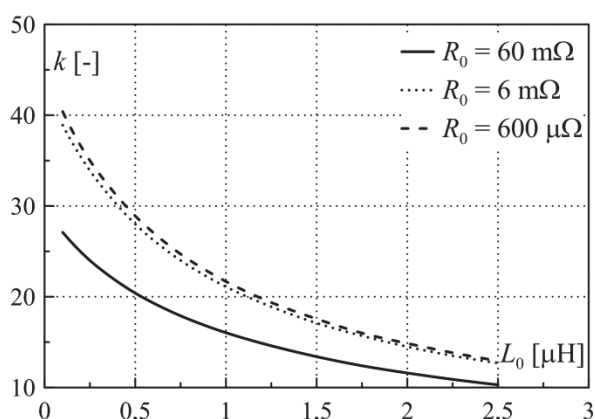


Rys. 7. Zależność maksymalnej energii pola magnetycznego  $E_{\max}$  zgromadzonej w cewce obciążenia od indukcyjności  $L_0$  oraz dla trzech wartości rezystancji cewki obciążenia  $R_0$

Jak wynika z rys.7 dla danego modelu GM istnieje pewna wartość indukcyjności obciążenia  $L_0$ , dla której energia zgromadzona w polu magnetycznym osiąga wartość maksymalną. Należy zwrócić uwagę na istotny wpływ rezy-

stancji cewki  $R_0$  na wartość maksymalną prądu  $i_{\max}$  oraz maksymalną energię pola magnetycznego  $E_{\max}$ . Wynika stąd, że cewkę obciążenia należy wykonać z przewodu o stosunkowo dużym przekroju poprzecznym i możliwie małej rezystywności. Dla rezystancji cewki obciążenia  $R_0$  rzędu kilku  $m\Omega$  dla danego GM optymalna wartość indukcyjności obciążenia  $L_0$  wynosi około  $1 \mu\text{H}$ .

Na rys. 8 przedstawiono zależność wzmocnienia generatora od indukcyjności i dla trzech wartości rezystancji cewki obciążenia.



Rys. 8. Zależność współczynnika wzmocnienia prądu  $k$  od indukcyjności  $L_0$  oraz dla trzech wartości rezystancji cewki obciążenia  $R_0$

Generator pracujący ze zwartym obciążeniem ma wzmocnienie około 44. Zwiększenie indukcyjności obciążenia powoduje istotne zmniejszenie prądu generatora. Znaczny wpływ na wzmocnienie ma również rezystancja obciążenia. W projektowanych układach należy rozważyć zmniejszenie rezystancji obciążenia poprzez zastosowanie równoległych cewek o dużych przekrojach poprzecznych.

#### 4. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych dla przyjętego modelu GM wynikają następujące wnioski:

- współczynnik wzmocnienia prądu w układzie generatora megnatokumulacyjnego – obciążenie maleje nieliniowo (w przybliżeniu wykładniczo) w funkcji wartości indukcyjności obciążenia  $L_0$ ,
- bardzo istotny wpływ na wartość współczynnika wzmocnienia prądu  $k$  ma rezystancja obciążenia  $R_0$ . Wraz ze wzrostem rezystancji obciążenia wzmocnienie maleje nieliniowo. Największy wpływ rezystancji obciążenia obserwuje się dla niewielkich wartości indukcyjności obciążenia  $L_0$ ,

- dodatkowymi zjawiskami wpływającymi na zmniejszenie współczynnika wzmocnienia prądu w układzie jest wzrost rezystancji uzwojenia cewki obciążenia  $R_0$  w wyniku wzrostu temperatury i wzrostu rezystancji w wyniku zjawiska naskórkowości. Czynniki te nie były badane w ramach niniejszej pracy,
- maksymalna energia pola magnetycznego w obciążeniu osiąga wartość największą dla określonej wartości indukcyjności obciążenia  $L_0$ . Na wartość tej energii duży wpływ ma również wartość rezystancji obciążenia  $R_0$ . Dla większych wartości  $R_0$  charakterystyka  $E_{\max} = f(L_0)$  staje się bardziej płaska, czyli wpływ rezystancji jest mniejszy.

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

## LITERATURA

- [1] Altgilbers L.L., et. al., Magnetocumulative Generators. With a Foreword by C. M. Fowler. Springer Verlag, New York, 2000.
- [2] Knoepfel H.E., Magnetic fields. A Comprehensive Theoretical Treatise for Practical Use. John Wiley & Sons. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2000.
- [3] Neuber A.A., Explosively Driven Pulsed Power. Helical Magnetic Flux Compression Generators. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
- [4] Wołoszyn M., Jakubiuk K., Zimny P., Kowalak D., Comparative Analysis of Coaxial Magnetocumulative Generators. Archives of Electrical Engineering, vol. 66, pp. 681–692, 2017.
- [5] Jakubiuk K., Kowalak D., Nowak M., The forming and emission of high power electromagnetic pulses, ITM Web Conference, Volume 19, 2018 Computer Applications in Electrical Engineering (ZKwE'2018).

## LOAD PARAMETERS OPTIMIZATION OF THE FLUX COMPRESSION GENERATOR

Computer simulation results of the flux compression generator (FCG) loaded with an inductor has been presented in this paper. Simulation research has been performed in order to optimize the load parameters of the selected model of FCG coil. The influence of the load inductance and resistance on the current gain factor and the load accumulated magnetic field energy has been investigated.

*(Received: 22.02.2019, revised: 08.03.2019)*