

Mirosław WOŁOSZYN\*  
Kazimierz JAKUBIUK\*  
Paweł ZIMNY\*

## KOAKSJALNY MAGNETOKUMULACYJNY GENERATOR PRĄDU

W pracy przedstawiono wyniki symulacji komputerowej koaksjalnego magnetokumulacyjnego generatora prądu (MGP). Badania symulacyjne przeprowadzono dla różnych wartości średnicy wewnętrznej, długości i prędkości odkształcania elementu MGP.

SŁOWA KLUCZOWE: magnetokumulacja, generator prądu, detonacja

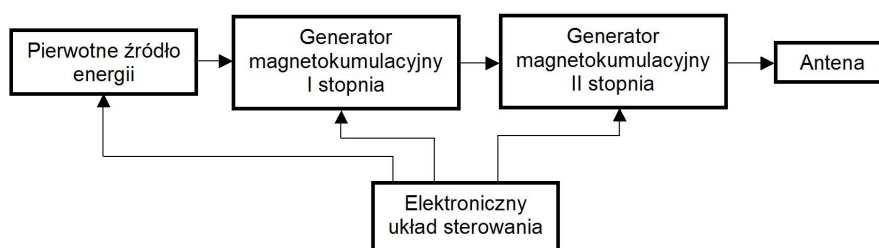
### 1. WSTĘP

W wielu badaniach szybkich procesów w układach fizycznych i elektrycznych wymagane są udary prądowe o bardzo dużej wartości maksymalnej (rzędu MA) i bardzo krótkim czasie narastania (rzędu  $\mu$ s). Tego rodzaju generatory prądu mogą być budowane jako tzw. magnetokumulacyjne generatory prądu (MGP) [1, 2]. Idea działania MGP polega na tym, że w wyniku przepływu prądu o wartości rzędu kA ze źródła pierwotnego, np. baterii kondensatorów 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 zwarciu 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]. Kilkadziesiąt procent energii kinetycznej układu zostanie zamieniona w energię pola magnetycznego. 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]. Stosując kaskadowe połączenie kilku zsynchronizowanych ze sobą układów z kompresją pola magnetycznego można uzyskać impulsy prądowe o wartości rzędu kilkudziesięciu MA i wartości indukcji magnetycznej w końcowym stopniu rzędu kilkuset T.

---

\* Politechnika Gdańska.

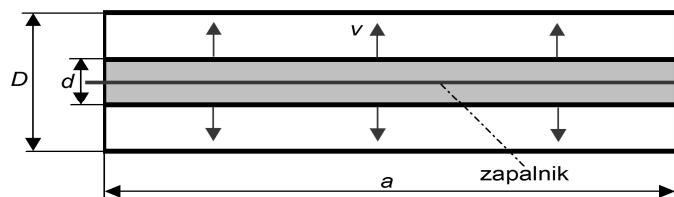
W praktyce stosuje się wiele różnych geometrii MGP [1, 2]. Obciążeniem MGP jest na ogół cewka indukcyjna o bardzo małej indukcyjności, rzędu nH, w której uzyskuje się pole magnetyczne o dużej wartości. Cewka ta może pełnić np. rolę anteny. W pracy metodą symulacyjną przeanalizowano wytwarzanie udarów prądowych w jednym z najprostszych MGP - tzw. koaksjalnych (rys. 1).



Rys. 1. Schemat blokowy złożonego MGP z obciążeniem w postaci anteny

## 2. MODEL OBWODOWY

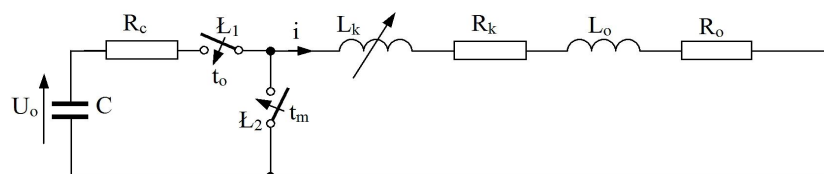
Jednym z pierwotnych źródeł energii w układach kumulacji pola magnetycznego stosowany jest przewód koaksjalny MGP z materiałem wybuchowym (rys. 2). Wewnątrz miedzianej rurki o średnicy  $d$  umieszczony jest materiał wybuchowy z zapalnikiem rozciągniętym wzdłuż osi przewodu, w celu zapewnienia jednoczesnej detonacji materiału na całej jego długości. Przewód koaksjalny z jednej strony podłączony jest poprzez łącznik do źródła napięcia (np. superkondensator), a z drugiej obciążony rezystancją  $R_o$  i indukcyjnością  $L_o$  (rys. 3).



Rys. 2. Przewód koaksjalny z materiałem wybuchowym

Po zamknięciu łącznika  $L_1$  zaczyna w obwodzie płynąć prąd. W momencie osiągnięcia maksymalnej jego wartości następuje detonacja materiału wybuchowego, jednocześnie wzdłuż osi symetrii układu. Detonacja powoduje bardzo szybkie zwarcie wejścia układu koaksjalnego (zamknięcie łącznika  $L_2$ ) i superkondensatora oraz powiększanie się średnicy wewnętrznej rurki miedzianej (rys. 2). Na skutek ruchu pole magnetyczne między rurkami zostaje "ściskane", co powoduje nagły wzrost prądu w obwodzie.





Rys. 3. Model obwodowy koaksjalnego, jednostopniowego MGP z obciążeniem

Przyjęty model obwodowy koaksjalnego MGP od chwili zamknięcia łącznika  $L_2$  opisuje równanie:

$$\frac{d\phi}{dt} + iR_1 + L_o \frac{di}{dt} + iR_o = 0 \quad (1)$$

gdzie:  $L_o$ ,  $R_o$  – odpowiednio indukcyjność i rezystancja obciążenia,  $L_k$ ,  $R_k$  – odpowiednio indukcyjność i rezystancja MGP,  $\phi$  – strumień magnetyczny w MGP obliczany ze wzoru:

$$\phi = \frac{\mu_o a i}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d + 2vt}\right) \quad (2)$$

Po wstawieniu (2) do (1) uzyskuje się równanie na pochodną prądu:

$$\frac{di}{dt} = \frac{i \left( \frac{\mu_o a}{2\pi} \frac{2v}{d + 2vt} - R_k - R_o \right)}{L_o + \frac{\mu_o a}{2\pi} \ln \frac{D}{d + 2vt}} \quad (3)$$

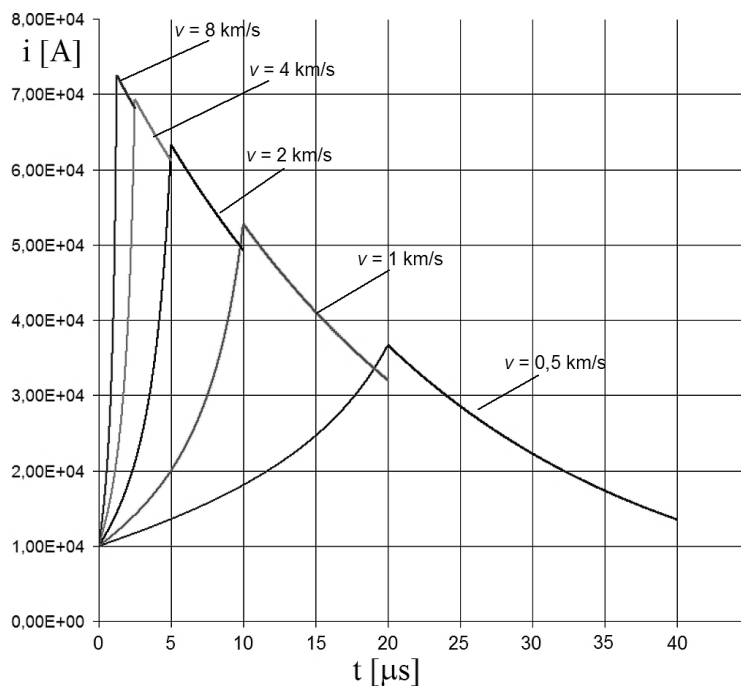
gdzie:  $a$ ,  $d$ ,  $D$  – wymiary MGP (rys.2),  $v$  – prędkość odkształcenia rurki wewnętrznej (rys. 2).

Równanie (3) rozwiązano numerycznie metodą Runge-Kutty 4. rzędu. Wartość początkową prądu w chwili zamknięcia łącznika ( $t = t_m$ ) przyjęto równą 10 kA. Obliczenia przeprowadzono dla przewodu koaksjalnego o długości  $a = 0,1; 0,3$  i  $0,5$  m, grubości rurek miedzianych 1 mm, średnicy  $d = 1$  cm, średnicy  $D = 2; 2,5$  i  $3$  cm, rezystancji  $R_o = 500 \mu\Omega$  oraz indukcyjności  $L_o = 10$  nH. Założono, że prędkość odkształcenia wewnętrznej rurki jest stała.

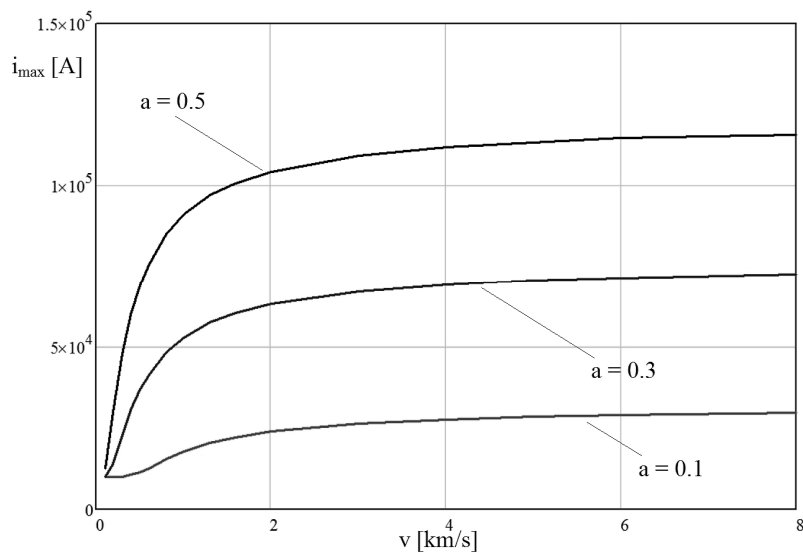
### 3. WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

Na rys. 4 przedstawiono przebiegi prądu w układzie dla wybranych prędkości odkształcenia. Od chwili połączenia się obu rurek miedzianych prąd rozładowuje się w obwodzie  $R_o$ ,  $L_o$ .

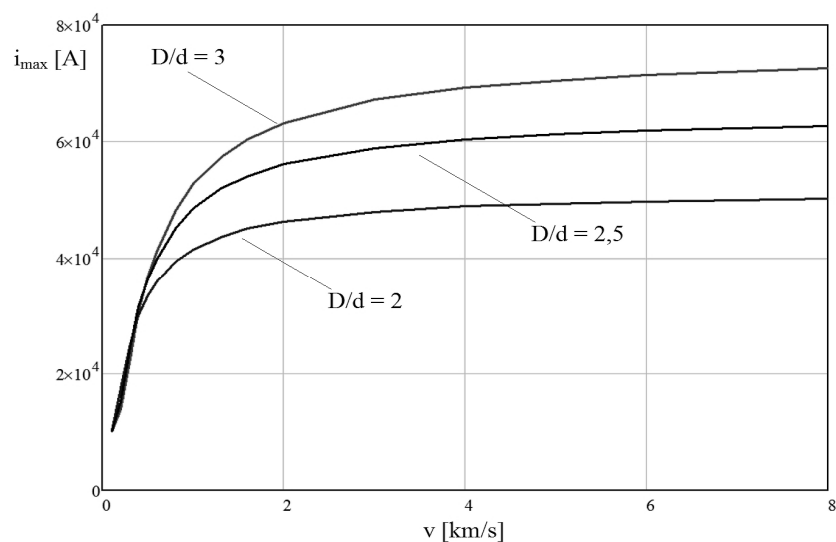
Na rys. 5 pokazano zależność maksymalnej wartości prądu w układzie od prędkości odkształcenia  $v$  dla trzech długości przewodu koaksjalnego, a na rys. 6 zależność maksymalnej wartości prądu od prędkości  $v$  dla trzech różnych wartości  $D/d$ .



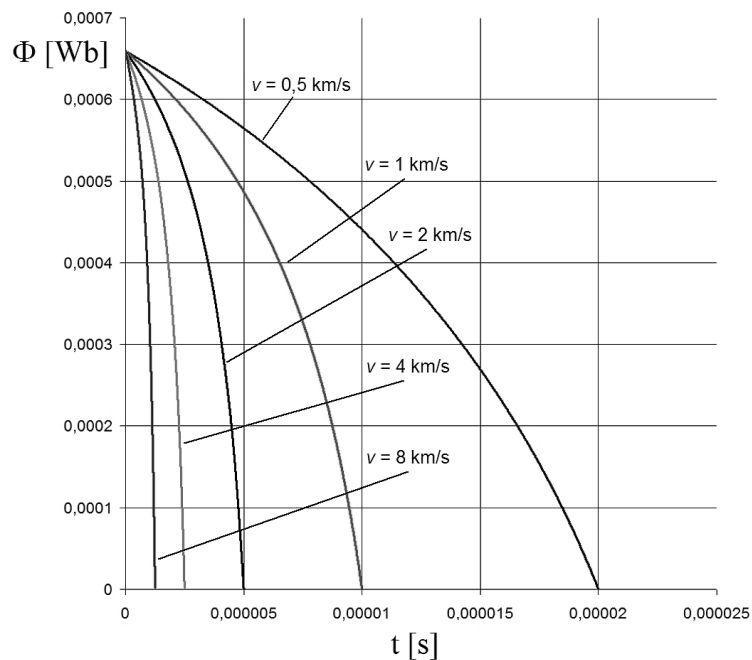
Rys. 4. Przebieg prądu dla różnych wartości prędkości odkształcenia dla  $a = 0,3$  m i  $D/d = 3$



Rys. 5. Zależność maksymalnej wartości prądu od prędkości odkształcenia dla  $D/d = 3$

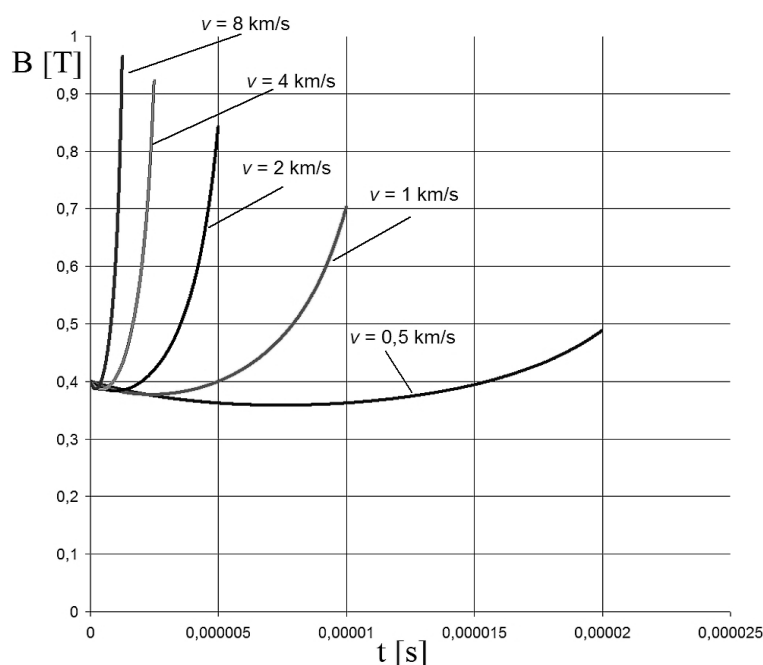


Rys. 6. Zależność maksymalnej wartości prądu od prędkości odkształcenia dla trzech różnych wartości  $D/d$  (dla długości rurek  $a = 0.3\text{m}$ )



Rys. 7. Przebieg strumienia magnetycznego w układzie dla różnych wartości prędkości odkształcenia dla  $a = 0,3\text{m}$  i  $D/d = 3$

Z rys. 5 wynika, że maksymalne wartości prądu nie wzrastają proporcjonalnie do wartości prędkości odkształcenia. Największy wzrost następuje dla prędkości do 2 km/s. Wynika to stąd, że o stanie przejściowym w układzie MGP decyduje zarówno szybkość procesu kumulacji pola magnetycznego, jako również parametry L i R obwodu (rys. 3). Na rys. 7 pokazano przebieg strumienia magnetycznego, a na rys. 8 zmiany indukcji magnetycznej na powierzchni rurki wewnętrznej. Jak można zauważyć strumień magnetyczny osiąga wartość równą zero w czasie odwrotnie proporcjonalnym do prędkości odkształcenia wewnętrznej rurki. W końcowym etapie odkształcenia rurki indukcja magnetyczna przyjmuje największą wartość około 1 T.



Rys. 8. Przebieg indukcji magnetycznej na powierzchni rurki wewnętrznej dla różnych wartości prędkości odkształcenia oraz  $a = 0,3\text{m}$  i  $D/d = 3$

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej prądu w koaksjalnym MGP wynikają następujące wnioski:

- w rozważanym układzie MGP można spodziewać się w przybliżeniu siedmiokrotnego wzrostu prądu w stosunku do prądu pierwotnego,

- największe wzmocnienie prądu występuje dla układu o dużej wartości długości  $a$ , dużym stosunku  $D/d$  oraz możliwie największej prędkości odkształcenia,
- zbyt duży stosunek długości układu do średnicy  $d$ , może spowodować niejednakowe powiększanie się średnicy mniejszej rurki podczas detonacji materiału wybuchowego, zmniejszając w ten sposób efekt magnetokumulacji,
- w praktyce zbyt duży stosunek wymiarów  $D/d$  może powodować pękanie miedzianej rurki i istotne zmniejszenie wzmocnienia prądu.

*Praca została sfinansowana przez NCBiR  
w ramach projektu badawczego – umowa nr DOB-1-1/1/PS/2014*

### LITERATURA

- [1] Altgilbers L. L., i inni.: Magnetocumulative Generators. With a Foreword by C. M. Fowler. Springer Verlag. New York, 2000.
- [2] Knoepfel G.: Pulsed High Magnetic Fields, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1970.
- [3] Knoepfel H., E.: Magnetic fields. A Comprehensive Theoretical Treatise for Practical Use. John Wiley & Sons. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2000.

### COAXIAL MAGNETOCUMULATIVE POWER GENERATOR

The results of computer simulation of the coaxial magnetocumulative current generator (MGP) were presented in this paper. The simulation tests were carried out for different values of internal diameter, length and speed of the deformation of an MGP element.

*(Received: 14. 02. 2016, revised: 2. 03. 2016)*

