



## Stanowisko do elektromagnetycznego rozciągania pierścieni jako aparatura umożliwiająca badanie właściwości dynamicznych metali

JACEK JANISZEWSKI, WIESŁAW PICHOLA\*

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, \*Instytut Optoelektroniki,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono konstrukcję stanowiska do elektromagnetycznego rozciągania cienkościennych pierścieni metalowych. Stanowisko to zapewnia radialną ekspansję próbki pierścieniowej z maksymalną prędkością radialną przekraczającą 200 m/s. Ponadto, umożliwia ono wychwytywanie elementów sfragmentyzowanego pierścienia z zachowaniem kształtu odłamków po procesie fragmentacji. W artykule szczegółowo opisano układ elektryczny stanowiska oraz dokonano analizy prądowo-napięciowej w układzie solenoidu i w pierścieniu. Stwierdzono, że zastosowanie wysokonapięciowych tyrystorów impulsowych jako przełączników gwarantuje wydajne rozładowanie baterii kondensatorów i może być rozwiązaniem alternatywnym w stosunku do metod opisywanych w literaturze.

**Słowa kluczowe:** dynamiczne właściwości metali, elektromagnetyczna metoda pierścieniowa, elektromagnetyczne rozpękanie pierścieni

**Symbole UKD:** 669.018.2

### 1. Wprowadzenie

Pierwsze doniesienia o zastosowaniu osiowosymetrycznego rozciągania pierścieni cienkościennych do wyznaczania właściwości dynamicznych metali są datowane od początku lat 60. XX wieku [1]. Pionierami w zastosowaniu tej metody byli Johnson, Stein i Davies, którzy rozciągali udarowo pierścienie metalowe za pomocą energii wybuchu cylindrycznego ładunku materiału wybuchowego. W związku z trudnościami w stosowaniu wybuchowej metody pierścieniowej (problemy z precyzyjnym kontrolowaniem prędkości rozciągania, konieczność wykonywania

badania w specjalnie przystosowanych pomieszczeniach — bunkrach), w 1965 r. Niordson opracował technikę rozciągania próbek pierścieniowych za pomocą pola elektromagnetycznego [2]. Polegała ona na tym, że radialne rozciąganie następowało w wyniku rozładowania baterii kondensatorów przez solenoid, na którym znajdował się osadzony osiowosymetrycznie pierścień metalowy.

Wyznaczenie właściwości dynamicznych materiałów z użyciem metody pierścieniowej polega ogólnie na rejestracji radialnego ruchu lub promieniowej prędkości rozciągającego się pierścienia cienkościennego. W przypadku, gdy szerokość i wysokość pierścienia jest mała w porównaniu z jego średnicą, podczas swobodnego rozciągania, pod wpływem siły bezwładności pojawia się obwodowe, jednowymiarowe naprężenie rozciągające  $\sigma_{\theta}$ , które hamuje ruch ścianek pierścienia. Naprężenie to można określić za pomocą następującego równania:

$$\sigma_{\theta} = -\rho r \frac{\partial^2 r}{\partial t^2}, \quad (1)$$

gdzie  $\rho$  jest gęstością materiału pierścienia,  $r$  oznacza średni jego promień, a  $t$  — czas.

Z kolei odkształcenie względne  $\varepsilon_{\theta}$ , odpowiadające naprężeniu  $\sigma_{\theta}$ , oblicza się według równania:

$$\varepsilon_{\theta} = \int_{r_0}^r \frac{dr}{r} = \ln \frac{r}{r_0}. \quad (2)$$

Pomiar zmian promienia realizowany jest metodami optycznymi, z użyciem szybkich kamer fotograficznych lub techniką rentgenowską. Pewną wadą metody pomiaru promienia jest konieczność zapewnienia wysokiej precyzji w określeniu zmian geometrycznych pierścienia. Mały błąd w określeniu promienia pierścienia wywołuje stosunkowo duży błąd w obliczeniach naprężenia obwodowego, wynikający głównie z konieczności podwójnego różniczkowania funkcji  $r(t)$ . Z tego powodu obecnie najczęściej stosuje się metodę bezpośredniego pomiaru prędkości ruchu ścianki pierścienia przy wykorzystaniu interferometru laserowego (ang. *velocity interferometr system for any reflector VISAR*) [3], wobec czego naprężenia obwodowe są obliczane w wyniku jednokrotnego zróżniczkowania funkcji  $v(t) = dr/dt$ .

Liczne zalety elektromagnetycznego rozpęczania pierścieni w porównaniu z innymi metodami badań właściwości mechanicznych materiałów zostały stosunkowo szybko dostrzeżone przez wielu naukowców [4, 5]. Główną zaletą tej metody jest to, że istniejący stan naprężenia w rozciąganej, cienkościennej próbce pierścieniowej jest bardzo bliski jednorodnemu i jednowymiarowemu naprężeniu rozciągającemu — co jest trudne do osiągnięcia w razie zastosowania innych technik badawczych. Ponadto, szczególnie w przypadku elektromagnetycznego rozciąga-

nia, w którym prądy są jednorodne w całym przekroju poprzecznym próbki, siły rozciągające pierścień mają charakter sił masowych. Rozciąganie pierścienia jest więc dokonywane bez indukowania zjawisk falowych, zachodzących na przykład wtedy, gdy deformacja dynamiczna jest wynikiem działania sił mechanicznych (np. w dzielonym pręcie Hopkinsona).

Oprócz tego, prędkość rozszerzania promieniowego, a co za tym idzie również szybkość odkształcenia oraz przyspieszenie, mogą być bardzo precyzyjnie kontrolowane przez stosunkowo łatwe dostosowanie charakterystyk obwodu elektrycznego solenoidu. Natomiast dzięki dużemu sprzężeniu elektromagnetycznemu pomiędzy obwodem pierwotnym cewki a pierścieniem można osiągać duże szybkości odkształcenia rzędu  $10^4 \text{ s}^{-1}$ , stosując relatywnie nieduże napięcia ładowania baterii kondensatorów (typowy zakres  $1 \div 10 \text{ kV}$ ). Niebagatelną zaletą elektromagnetycznego rozpęczania jest również to, że można je wykonywać w standardowych warunkach laboratoryjnych, które — w odróżnieniu od wybuchowej metody pierścieniowej — nie wymagają specjalnie przygotowanych pomieszczeń.

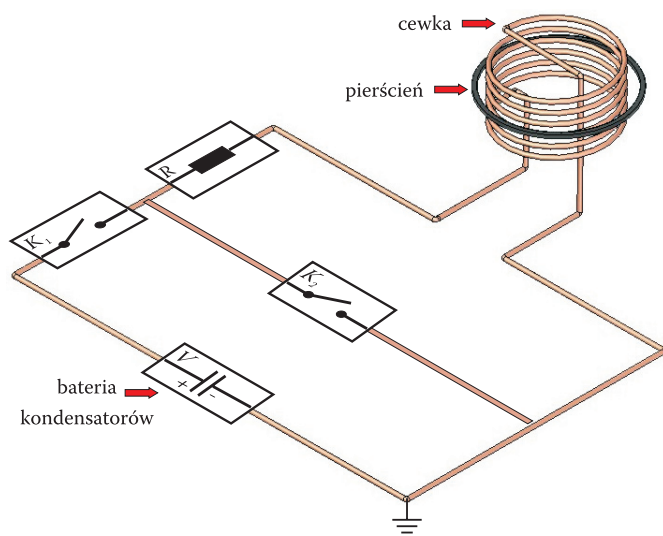
Do najistotniejszych wad elektromagnetycznego rozciągania, których skutki w znaczny sposób można ograniczyć lub wręcz wyeliminować, należy zaliczyć: (1) nagrzewanie się materiału próbki w wyniku przepływu prądu (nagrzewanie indukcyjne), (2) możliwość powstawania, podczas fragmentacji pierścienia, łuku elektrycznego, który może wywoływać dodatkowe, lokalne nagrzewanie się materiału oraz (3) pewne trudności techniczne w rozciąganiu pierścieni wykonanych z materiałów dielektrycznych [6].

Pomimo powyższych niedogodności, po 2000 roku odnotowuje się bardzo duże zainteresowanie metodą elektromagnetycznego rozciągania, znajdującą szerokie zastosowanie w badaniach dotyczących fragmentacji/pęknięcia materiałów w warunkach dynamicznego odkształcenia [7-11]. Ponadto, ukazały się także opracowania, prezentujące zmodyfikowany układ elektryczny metody pierścieniowej, który oprócz funkcji rozciągania realizuje jednocześnie intensywne nagrzewanie pierścienia [12, 13]. Taki układ badawczy pozwala nie tylko badać dynamiczne właściwości metali, ale także określać je w warunkach impulsowego nagrzewania adiabatycznego.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pierwszego etapu prac, których celem było wykonanie prototypowego stanowiska doświadczalnego do elektromagnetycznego rozciągania i fragmentacji próbek pierścieniowych w warunkach otoczenia lub niskich temperatur (do  $-40^\circ\text{C}$ ). W pierwszej części przedstawiono zasadę pracy stanowiska, rozwiązanie konstrukcyjne zespołu napędzającego oraz projekt układu elektrycznego zespołu zasilającego. W drugiej części omówiono parametry elektryczne i sposób działania zespołu zasilającego oraz przedstawiono pierwsze wyniki elektromagnetycznego rozciągania pierścieni wykonanych z miedzi M1E.

## 2. Istota elektromagnetycznego rozciągania pierścienia

Rozciąganie metalowych pierścieni za pomocą impulsowego pola elektromagnetycznego zachodzi w rezultacie wzajemnego oddziaływania pól elektromagnetycznych, które powstają w wyniku przepływu prądów przez cewkę i rozciągany pierścień. Schemat stanowiska laboratoryjnego realizującego elektromagnetyczne rozpęcznie został przedstawiony na rysunku 1. Układ elektryczny składa się ze źródła zasilania w postaci baterii kondensatorów, dwóch przełączników, cewki oraz cienkościennego pierścienia wykonanego z badanego materiału, charakteryzującego się dobrą przewodnością elektryczną.



Rys. 1. Schemat ideowy układu elektromagnetycznego rozpęczenia

Proces ekspansji promieniowej pierścienia metalowego odbywa się następująco: początkowo kondensatory są ładowane do napięcia  $V_0$  (zazwyczaj maksymalne wartości napięcia mieszczą się w przedziale od 2 do 10 kV), a następnie obwód elektryczny zasilania jest zamykany przełącznikiem  $K_1$ . W obwodzie zaczyna płynąć prąd, który osiąga wartość od kilku do kilkudziesięciu kiloamperów. Ten zmienny w czasie prąd generuje zmienny strumień magnetyczny, indukujący w metalowym pierścieniu zmienny prąd o kierunku przeciwnym do kierunku prądu cewki. W ten sposób cewka i pierścień odpychają się wzajemnie, wywołując, w przypadku sztywnego zamocowania zwojów cewki, promieniowe rozciąganie pierścienia z prędkościami radialnymi osiągającymi kilkaset metrów na sekundę. W pewnej chwili od momentu zadziałania przełącznika  $K_1$ , kiedy prąd w obwodzie cewki ma małą bezwzględną wartość, przełącznik  $K_2$  zwiera baterię kondensatorów. Od tego

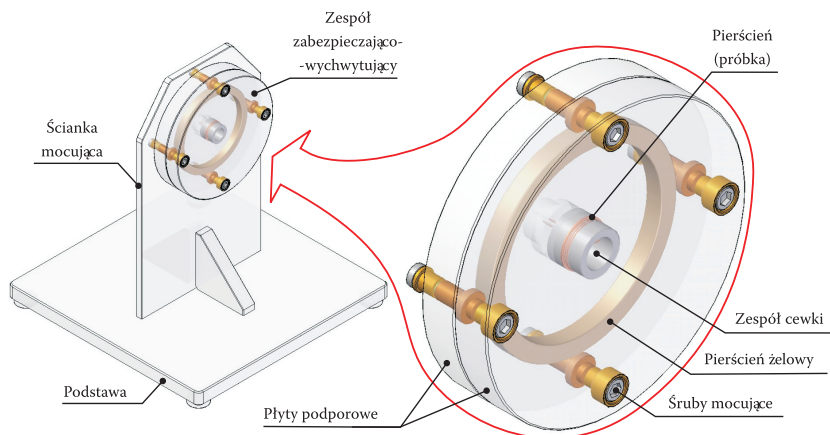
momentu pierścieni porusza się w wyniku działania sił bezwładności, a mierzona wartość opóźnienia pierścienia jest zależna wyłącznie od własności fizykomechanicznych materiału, z którego wykonano pierścieni. Końcowym etapem rozszerzania się pierścienia jest jego fragmentacja, następująca po czasie charakterystycznym dla badanego materiału i warunków napędzania.

### 3. Konstrukcyjne stanowiska do elektromagnetycznego rozpęczenia

Stanowisko do rozszerzania elektromagnetycznego można umownie podzielić na dwa zespoły: zespół napędzający — służący do nadania prędkości radialnej ściankom pierścienia, i zespół zasilania — zapewniający dostarczenie odpowiedniej energii do zespołu napędzającego.

#### 3.1. Zespół napędzający

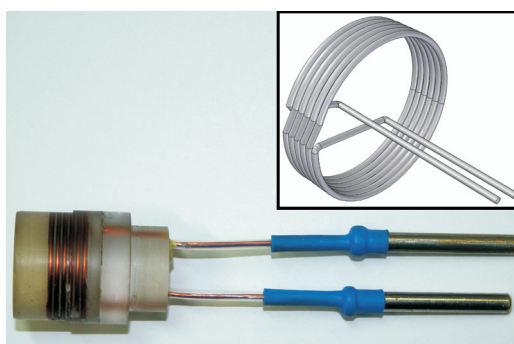
Konstrukcję zespołu napędzającego przedstawiono na rysunku 2. Składa się on z czterech podstawowych elementów: podstawy, ścianki mocującej, zespołu zabezpieczająco-wychwytyjącego (zespół ZW) oraz znajdującego się wewnątrz niego zespołu cewki z osadzonym na cewce pierścieniem. Rozwiązanie konstrukcyjne zespołu zapewnia pionowe ustawienie zespołu ZW. Jest to ważne, gdyż taka jego pozycja znacznie ułatwia pozycjonowanie kamer rejestrujących ruch rozszerzającego się pierścienia, a ponadto zapewnia swobodę w dostosowaniu konfiguracji oświetlenia.



Rys. 2. Konstrukcja zespołu napędzającego stanowiska do elektromagnetycznego rozpęczenia pierścieni

Zespół ZW składa się z dwóch złączonych śrubami pleksiglasowych płyt podporowych w kształcie grubościennych krążków. Krążki te zaprojektowane są w ten sposób, aby ich powierzchnie jednoznacznie ustalały położenie zespołu cewki względem pierścienia żelowego. Płyty podporowe wykonano z 25 mm płyt pleksiglasowych w celu zapewnienia bezpieczeństwa przed niekontrolowanym rozlotem odłamków powstałych ze sfragmentowanego pierścienia. Płyty podporowe zostały wykonane z materiału transparentnego, umożliwiającego dogodną i bezpieczną obserwację optyczną. Jedynie powierzchnia płyty tylnej ma zmatowioną powierzchnię w celu rozproszenia światła padającego z układu oświetlenia. Ponadto, na powierzchni tej płyty naklejono ekran skalujący (niezaznaczony na rysunku 2). Pierścień żelowy, który pełni rolę substancji wychwytyjącej, został wykonany z żelu parafinowego CH 16000 firmy Chemargo. Właściwości fizyko-mechaniczne tego żelu pozwalają wyhamować fragmenty pierścienia bez wywoływania w nich dodatkowych odkształceń plastycznych.

Wewnątrz zespołu ZW zamontowano osiowosymetrycznie zespół cewki; rozwiązanie konstrukcyjne tego zespołu przedstawiono na rysunku 3. Dane dotyczące ilości zwojów cewki, jej średnicy, odległości pomiędzy poszczególnymi zwojami oraz wielkości przerwy pomiędzy cewką a pierścieniem zostały zaczerpnięte z pracy [13].



Rys. 3. Widok zespołu cewki ze schematem uzwojenia

Ponieważ podczas dynamicznego rozciągania pierścienia występują duże obciążenia, główny element konstrukcyjny zespołu cewki (rdzeń) wykonano z poliwęglanu. Ponadto, w trakcie wykonywania zespołu cewki zastosowano zbrojoną włóknami szklanymi żywicę epoksydową. Solenoid wykonano z miedzianego drutu nawojowego, którego średnica wynosi 1,3 mm.

W celu otrzymania cewki o pożądanym wymiarach, w rdzeniu cewki wytoczono rowki ustalające drut nawojowy. Podczas montażu zespołu cewki, przed nawinięciem drutu pokrywano rowki tulei cewki warstwą żywicy epoksydowej

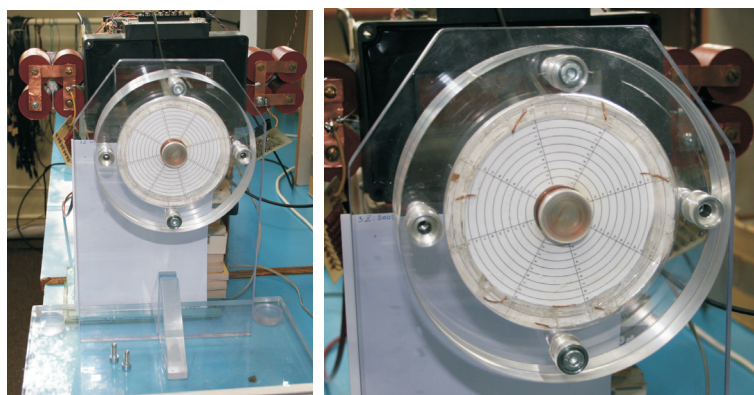


z dodatkiem krótkich włókien szklanych. Po nawinięciu drutu, w przestrzeniach pomiędzy zwojami umieszczono rowing szklany i nanoszono ponownie żywicę epoksydową. Po tej operacji całą cewkę dodatkowo pokryto tkaniną szklaną, tworząc wielowarstwową powłokę o grubości około 1 mm. Szczególną uwagę przywiązano do właściwego wypełnienia rowingiem szklanym i żywicą wolnych przestrzeni wokół drutu nawojowego. Celem tych zabiegów było ograniczenie zjawiska tworzenia się pęcherzy powietrznych w przestrzeniach pomiędzy sąsiadującymi zwojami. Obecność takich pęcherzy ma bardzo duży wpływ na obniżenie żywotności cewki. W obszarze objętym pęcherzem powietrznym napięcia międzyzwojowe cewki mogą bowiem wywoływać łuk elektryczny, który niszczy drut cewki.

Końcowy etap montażu polegał na wyprowadzeniu końców drutów cewki przez otwory w rdzeniu poliwęglanowym i wypełnieniu żywicą epoksydową pozostałych wolnych przestrzeni. Ostatnią operacją wykonania zespołu cewki była obróbka skrawaniem powierzchni roboczych, wykonana po całkowitym utwardzeniu się żywicy epoksydowej. Celem tej operacji było uzyskanie takiej powierzchni ustalającej pierścieni, aby zapewniała ona ciasne pasowanie rdzenia cewki z pierścieniem oraz jego precyzyjne pozycjonowanie w płaszczyźnie symetrii biegnącej pomiędzy zwojem nr 3 a 4 cewki.

Zgodnie z wynikami badań zawartych w pracy [13], solenoid składa się z sześciu blisko usytuowanych (przerwa 0,3 mm) zwojów równoległych, których średni promień wynosi 14,55 mm. Jedynie na odcinku około 5 mm występuje ukośne przejście, zapewniające połączenie pomiędzy sąsiednimi zwojami. Taki kształt cewki gwarantuje prostopadłe rozpęcznie pierścienia względem osi podłużnej solenoidu i w konsekwencji ułatwia wychwytywanie odłamków, mimo stosunkowo wąskiego pierścienia żelowego (szerokość około 12 mm).

Widok wykonanego zespołu napędzającego wraz z zespołem cewki przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Widoki zespołu napędzającego

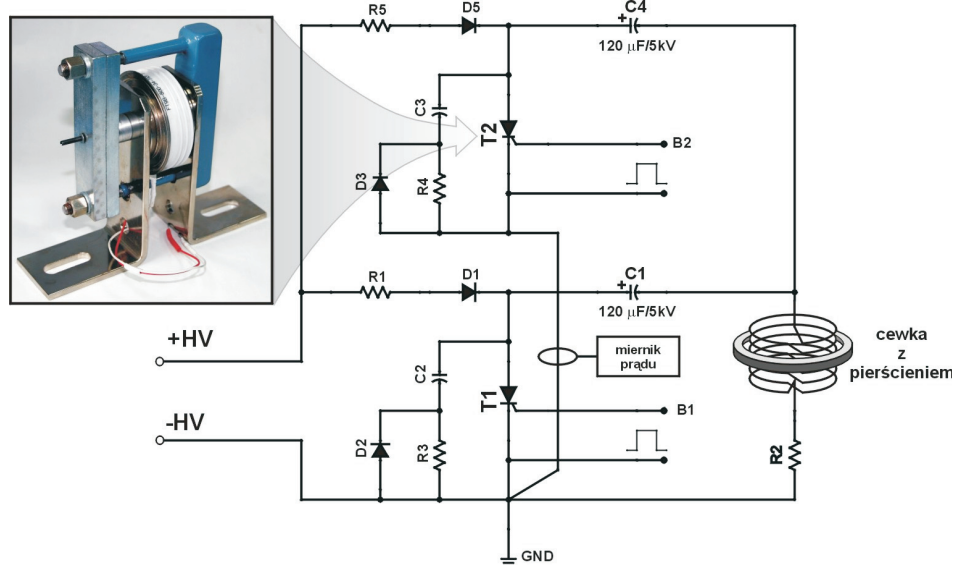
### 3.2. Zespół zasilania

Zespół zasilania tworzą dwa układy funkcjonalne: podzespół mocy oraz układ sterowania.

#### Podzespół mocy

Głównymi elementami podzespołu mocy (rys. 5) są: układ ładowania, dwa impulsowe tyrystory (typu FT9B-800) Q1 i Q2 jako przełączniki załączające oraz dwie sekcje kondensatorów gromadzących C1, C4, każda o pojemności 120  $\mu\text{F}$ .

Układ ładowania (rys. 5) umieszczony jest w oddzielnej, 19-calowej obudowie typu „Bopla”. Na płycie czołowej znajdują się przełącznik przerywowy W1 „sieć”, przełącznik przerywowy W2 „wł/wył WN”, potencjometr P1 do regulacji poziomu wysokiego napięcia i analogowy miernik napięcia wyjściowego. Układ ładowania zasilany z sieci jednofazowej wytwarza na wyjściu wysokie napięcie, które jest regulowane w przedziale  $0 \div 4 \text{ kV}$  i stabilizowane z dokładnością  $\pm 5 \text{ V}$ .



Rys. 5. Schemat ideowy podzespołu mocy

Po włączeniu przełączników W1 i W2 wysokie napięcie ładuje kondensatory gromadzące C1 i C4, odpowiednio przez rezystory R1, R5 i diody D1, D4, do napięcia ustalonego potencjometrem P1. Obydwa obwody ładowania zamykają się do masy przez cewkę L1 i rezystor R2. Podanie z układu sterowania na bramki B1 i B2 tyrystorów Q1 i Q2 impulsów wyzwalających powoduje rozładowanie



baterii kondensatorów C1 i C4 przez przewodzące tyrystory, cewkę i rezystor R2. Tyrystory w obwodzie pełnią rolę przełącznika K1, który został pokazany na rysunku 1. W opracowanym układzie nie zastosowano przełącznika K2, pomimo że rozładowanie ma charakter oscylacyjny. Brak drugiego przełącznika wynika z faktu, że tyrystory przewodzą prąd tylko w jednym kierunku, dlatego możliwy jest przepływ prądu tylko w pierwszym półokresie oscylacji.

Tyrystory są zabezpieczone przed przepięciami impulsowymi układami R, D, C. Dla tyrystora Q1 są to elementy D2, C2, R3, a dla tyrystora Q2 odpowiednio D3, C3, R4. Diody D1 i D4 separują obwody rozładowania poszczególnych baterii kondensatorów, a rezystory R1 i R5 ograniczają prąd ładowania kondensatorów gromadzących.

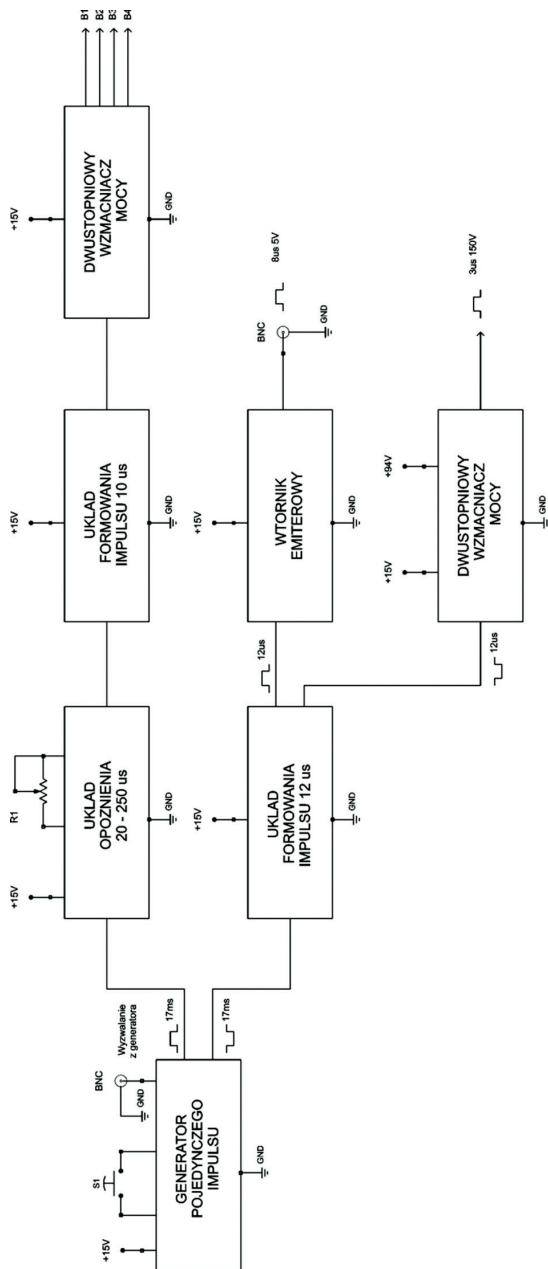
Do pomiaru prądu rozładowania w gałęzi z tyrystorem Q2 służy miernik bezkontaktowy o zakresie do 20 kA, który działa na zasadzie efektu Halla.

### Układ sterowania

Układ sterowania, którego schemat funkcjonalny pokazano na rysunku 6, spełnia następujące funkcje: steruje tyrystorami Q1 i Q2 oraz synchronizuje pracę kamer optycznych (smugowej i kadrowej CCD) rejestrujących proces rozciągania pierścienia.

Generator pojedynczego impulsu, sterowany ręcznie przyciskiem S1 lub sygnałem z generatora zewnętrznego dołączanego do gniazda BNC, wytwarza impuls o czasie trwania 17 ms. Następnie jest on podawany na wejścia układu opóźnienia i układu formowania impulsu 12  $\mu$ s. Układ formowania impulsu 12  $\mu$ s steruje wtórnikiem emiterowym i dwustopniowym wzmacniaczem mocy, z którego wyjścia, impulsem 3  $\mu$ s, 150 V uruchamiana jest kamera smugowa. Z wyjścia wtórnika emiterowego synchronizowana jest kamera CCD. Z kolei do wyjścia układu opóźnienia dołączony jest układ formowania impulsu 10  $\mu$ s sterujący drugim dwustopniowym wzmacniaczem mocy. Ten ostatni formuje impulsy bramkowe B1-B4 podawane synchronicznie na tyrystory Q1-Q4. W omawianym układzie wykorzystywane są tylko dwa wyjścia B1 i B2 do sterowania dwóch tyrystorów Q1 i Q2.

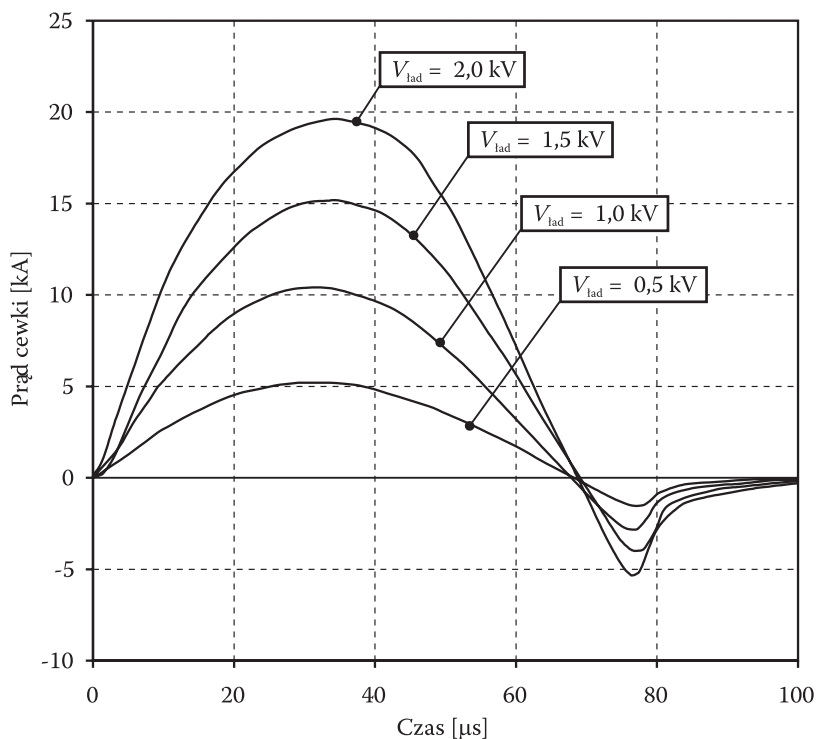
Generator pojedynczego impulsu, układ opóźnienia i układy formowania zbudowane są na układach scalonych CMOS. W dwustopniowych wzmacniaczach mocy i wtórniku emiterowym elementami przełączającymi są unipolarne tranzystory mocy. Izolację galwaniczną oraz odpowiedni poziom napięcia sygnałów wyjściowych ze wzmacniaczy mocy uzyskano, stosując specjalnie dobrane transformatory impulsowe.



Rys. 6. Schemat funkcjonalny układu sterowania

#### 4. Analiza prądowo-napięciowa układu elektrycznego stanowiska

W celu zbadania przebiegów impulsów prądowych w obwodzie cewki zastosowano bezkontaktowy miernik typu HAZ 20000. Pomiary przeprowadzono dla układu z cewką bez nałożonego pierścienia i dla następujących napięć ładowania kondensatorów: 0,5 kV, 1 kV, 1,5 kV i 2 kV. Wyniki tych badań zestawiono na rysunku 7.



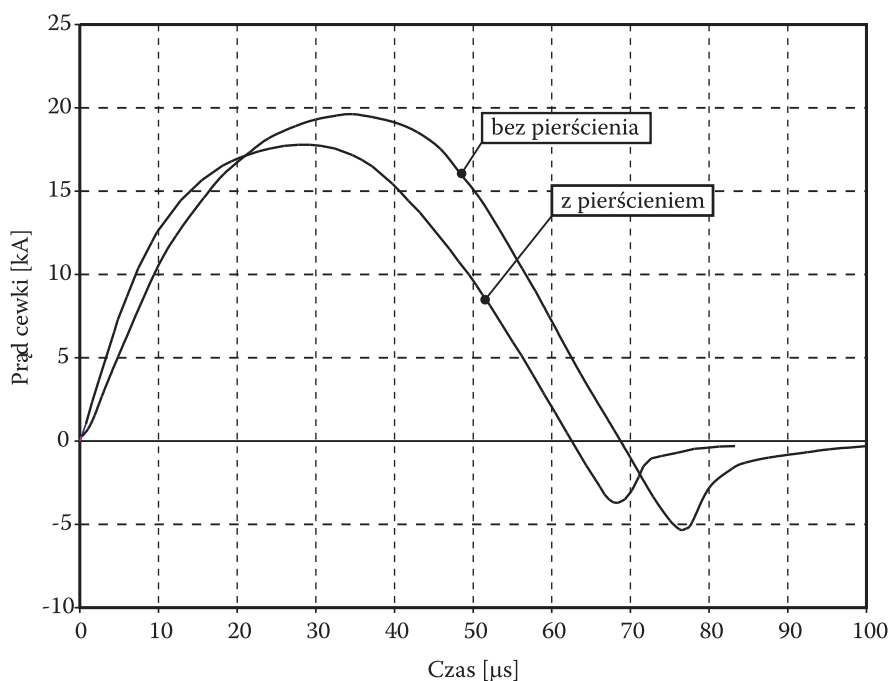
Rys. 7. Przebiegi impulsów prądowych w obwodzie cewki dla różnych napięć ładowania kondensatorów

Jak wynika z powyższego wykresu, dla baterii kondensatorów o łącznej pojemności około 240  $\mu$ F i dla cewki 6-zwojowej o indukcyjności własnej około 2,1  $\mu$ H, czas trwania impulsu prądowego wynosi około 68  $\mu$ s, niezależnie od napięcia ładowania kondensatorów. Zmierzony czas trwania impulsu prądowego  $t_i$  jest zbliżony do teoretycznie obliczonej wartości wynoszącej 68,7  $\mu$ s. Obliczenia wartości  $t_i$  wykonano za pomocą ogólnie znanych wzorów dla obwodu rezonansowego tłumionego i przy założeniu, że straty obwodu równe są rezystancji charakterystycznej  $R_L$  wyrażonej następującą zależnością:

$$R_L = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3)$$

Ponadto, stwierdzono, że maksymalne wartości prądów dla poszczególnych napięć ładowania kondensatorów wynoszą odpowiednio: dla napięcia 0,5 kV — 5,2 kA, dla 1 kV — 10,4 kA, dla 1,5 kV — 15,2 kA i dla 2 kV — 19,6 kA.

Następnie przeprowadzono analogiczne badania układu z cewką, na którą nasunięto pierścień miedziany o przekroju poprzecznym 1×1 mm. Przykładowo dla napięcia 2 kV (rys. 8) porównano zmiany prądu cewki z pierścieniem i bez pierścienia, gdzie wyraźnie widać różnice w przebiegach impulsów prądowych.

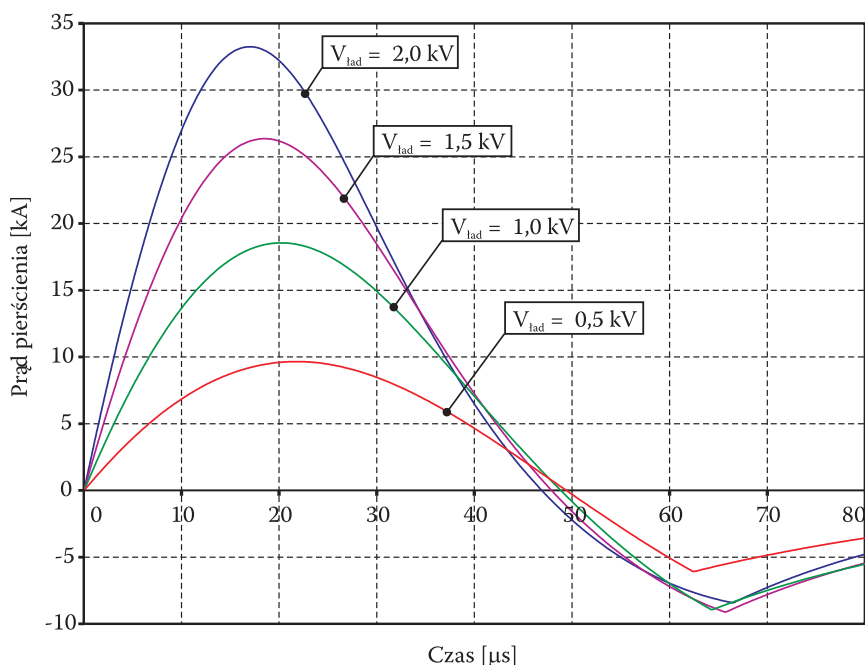


Rys. 8. Przebiegi impulsów prądowych w obwodzie cewki z pierścieniem i bez pierścienia dla napięcia ładowania kondensatorów 2 kV

Na początku należy stwierdzić, że dla obydwu przypadków przebieg prądowy ma charakter oscylacyjny. Całkowita rezystancja obwodu rozładowania, która jest sumą oporności rezystora tłumiącego  $R_2$  (3,57 mΩ), cewki (9,81 mΩ), doprowadzeń (~1 mΩ) oraz rezystancji pierścienia (2,21 mΩ) wnoszonej do obwodu pierwotnego, nie przekracza wartości rezystancji charakterystycznej  $R_L$ . Dla obwodu bez pierścienia obliczona wartość  $R_L$  wynosi 94,1 mΩ, podczas gdy w układzie z pierścieniem jest ona równa 84,7 mΩ.

Różnice w przebiegach impulsów wyrażają się zarówno w czasie trwania impulsu, jak i w jego amplitudzie. Czas trwania impulsu prądowego dla cewki z pierścieniem jest krótszy o około  $6 \mu\text{s}$  od impulsu otrzymanego w układzie bez pierścienia. Ponadto, maksymalny prąd cewki z pierścieniem wynosi  $17,8 \text{ kA}$  i jest mniejszy o  $1,8 \text{ kA}$  od prądu cewki pozbawionej pierścienia. Niższe wartości czasu trwania i amplitudy impulsu prądowego otrzymanego z układu z pierścieniem są wynikiem sprzężenia magnetycznego pierścienia z cewką. Sprzężenie to powoduje spadek indukcyjności głównej obwodu, a jednocześnie wywołuje wzrost jego rezystancji, gdyż do układu pierwotnego obwodu RLC wnosi się rezystancja obwodu wtórnego (pierścienia).

Z powodu występujących trudności technicznych z pomiarem prądu pierścienia, analizy prądów pierścienia dokonano na drodze rozważań teoretycznych za pomocą opracowanego kodu numerycznego, którego podstawy przedstawiono w pracy [15]. Dla wybranych napięć ładowania kondensatorów, przebiegi prądów generowanych w pierścieniu przedstawiono na rysunku 9. Prądy indukowane w pierścieniu są około 1,8 razy większe od prądów płynących w cewce i wynoszą odpowiednio: dla napięcia  $0,5 \text{ kV}$  —  $9,6 \text{ kA}$ , dla  $1 \text{ kV}$  —  $18,5 \text{ kA}$ , dla  $1,5 \text{ kV}$  —  $26,4 \text{ kA}$  i dla  $2 \text{ kV}$  —  $33,2 \text{ kA}$ . Ponadto, średni czas trwania impulsu prądowego pierścienia wynosi około  $48 \mu\text{s}$  i jest krótszy od okresu impulsu prądowego cewki o  $20 \mu\text{s}$ . Przypuszczać należy, że krótszy czas trwania impulsu prądowego pierścienia jest wynikiem oddalania



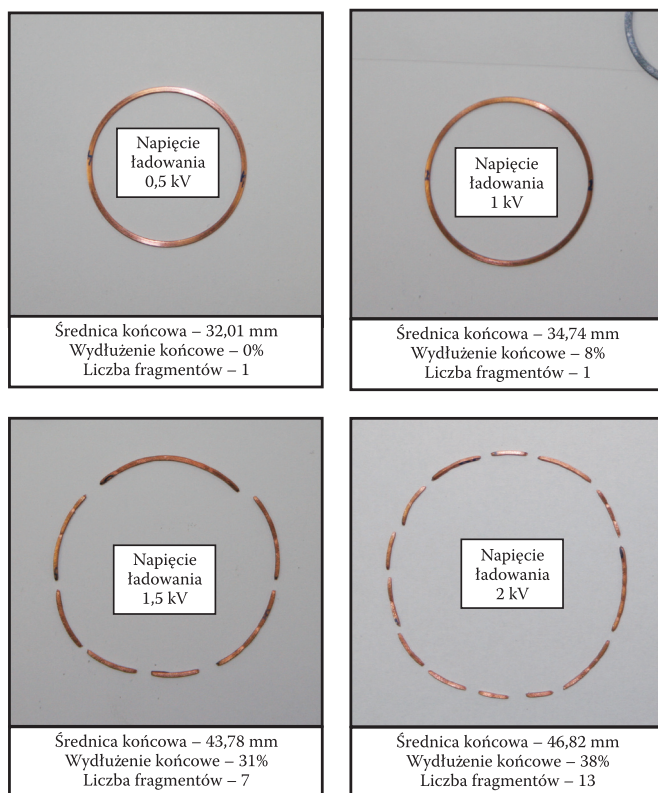
Rys. 9. Obliczone prądy pierścienia dla wybranych napięć ładowania kondensatorów

się pierścienia od cewki, co powoduje gwałtowny spadek sprzężenia elektromagnetycznego pomiędzy obwodami cewki i pierścienia.

## 5. Elektromagnetyczne rozciąganie próbek pierścieniowych

Za pomocą wyżej opisanego stanowiska badawczego przeprowadzono wstępne próby rozrywania pierścieni wykonanych z miedzi gatunku M1E. Wymiary pierścieni były następujące: średnia średnica pierścienia 32 mm, przekrój poprzeczny 1×1 mm. Rozciąganie pierścieni wykonano dla takich samych napięć ładowania kondensatorów, jakie przedstawiono w poprzednim rozdziale. Wyniki otrzymane podczas tych badań zestawiono na rysunku 10.

Średnią średnicę końcową wyznaczano bezpośrednio z pomiaru średnicy pierścienia, który nie uległ rozerwaniu w wyniku działania sił elektromagnetycznych. Natomiast, gdy pierścień fragmentował, określenie wartości średnicy końcowej



Rys. 10. Zestawienie wyników z rozciągania pierścieni miedzianych dla wybranych napięć ładowania



dokonywane było na podstawie pomiarów długości poszczególnych fragmentów pierścienia wychwyconych w żelu parafinowym. Pomiary średnicy i długości fragmentów pierścienia przeprowadzono za pomocą systemu komputerowego Lucia służącego do analizy obrazów cyfrowych. Na podstawie powyższych pomiarów obliczono również wydłużenie końcowe korzystając z równania 2. Rysunek 10 zawiera również dane dotyczące fragmentacji pierścienia, tj. liczbę powstałych odłamków (fragmentów).

Przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić, że wraz ze wzrostem napięcia ładowania kondensatorów odnotowuje się wzrost ww. parametrów. Jedynie w przypadku napędzania przy napięciu 0,5 kV nie stwierdzono żadnego odkształcenia plastycznego pierścienia. Próby rozciągania dla pozostałych napięć ładowania kondensatorów wykazały, że w tym przypadku pierścienie ulegają deformacji plastycznej. Wydłużenia końcowe dla poszczególnych napięć wynoszą odpowiednio: 8% dla 1 kV, 31% dla 1,5 kV i 38% dla 2 kV.

Z kolei fragmentacja próbek pierścieniowych zachodziła dopiero w warunkach rozciągania dla napięć 1,5 i 2 kV. W tych warunkach obciążenia pierścienie ulegały fragmentacji na wiele elementów, których ilość wynosiła odpowiednio 7 dla 1,5 kV i 13 dla 2 kV. Ponadto, zaobserwowano zjawisko powstawania tzw. „zamrożonych szyjek” (ang. *arrested necks*). Pojedyncze zamrożone szyjki były już widoczne na pierścieniach rozciąganych przy napięciu 1 kV, ale ich duża ilość pojawiała się dopiero wtedy, gdy rozciąganie następowało przy napięciach kondensatorów 1,5 kV i 2 kV. Przykładowo na rysunku 11 przedstawiono jeden z fragmentów pierścienia, w którym powstały trzy szyjki zamrożone.



Rys. 11. Przykładowy widok fragmentu pierścienia z tzw. zamrożonymi szyjkami

Analizując wyniki powyższych badań wstępnych, należy jeszcze wspomnieć o prędkościach radialnych, z jakimi ekspandowały pierścienie miedziane. Ogólnie na podstawie wyników uzyskanych podczas rejestracji optycznych stwierdzono, że dla napięcia baterii kondensatorów 2 kV, maksymalna promieniowa prędkość rozciągania przekroczyła wartość 200 m/s. Szczegółowe dane dotyczące prędkości ekspansji pierścienia dla wybranych napięć ładowania kondensatorów zostaną przedstawione w kolejnym opracowaniu.

## 6. Zakończenie

Przedstawione wyniki badań stanowiska do elektromagnetycznego rozciągania pozwalają stwierdzić, że skonstruowana aparatura badawcza umożliwiła dynamiczne rozciąganie próbek miedzianych w kontrolowany sposób i z prędkościami radialnymi przekraczającymi wartość 200 m/s. Zastosowanie silnopiędowych tyrystorów impulsowych do zwierania obwodów rozładowania baterii oraz mała indukcyjność doprowadzeń zapewnia dużą sprawność układu napędzania. Dzięki jednokierunkowemu przewodzeniu prądu przez tyrystory jest możliwe rozładowywanie kondensatorów rezonansowo, a nie aperiodycznie, co umożliwia uzyskanie większych amplitud prądów przy tych samych wartościach napięć kondensatorów. W konsekwencji przy stosunkowo niskim napięciu ładowania kondensatorów wynoszącym 2 kV, osiągnięta jest stosunkowo wysoka prędkość ekspansji przekraczająca wartość 200 m/s. Opisywane stanowisko badawcze stwarza także możliwość wychwytywania fragmentów pierścienia bez wywoływania w nich odkształceń plastycznych powodowanych zderzeniem ze ściankami zespołu napędzającego. Stanowisko jest także przystosowane do wykonywania rejestracji optycznych (transparentne ścianki zespołu napędzającego), a układ sterowania podzespołem mocy stanowiska posiada obwód zapewniający generowanie impulsów sterujących dla peryferyjnej aparatury badawczej (np. kamery CCD).

Jak zaznaczono na wstępie niniejszego artykułu, zaprezentowane stanowisko jest wersją prototypową, która pozwala uzyskiwać maksymalne prędkości napędzania przy napięciu ładowania kondensatorów nie przekraczającym wartości 2,3 kV. W celu uzyskania większych prędkości rozciągania przewiduje się modernizację tego stanowiska poprzez zastosowanie nowych, szybkich tyrystorów o wyższych prądach i napięciach maksymalnych. Dzięki temu napędzanie pierścieni będzie mogło się odbywać przy zastosowaniu wyższych napięć ładowania kondensatorów osiągających wartość 3,5 kV. Te zmiany umożliwią badanie pierścieni wykonanych z metali o wyższej oporności niż miedź i aluminium (powyżej 10  $\mu\Omega\text{cm}$ ) z wykorzystaniem metody pierścieni kompozytowych.

### Podziękowania

Autorzy pracy pragną podziękować ppłk dr inż. Robertowi Panowiczowi za wykonanie analizy numerycznej prądów pierścienia.

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego własnego nr 0 T00C 007 30 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Artykuł wpłynął do redakcji 12.12.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2008 r.

## LITERATURA

- [1] P. C. JOHNSON, B. A. STEIN, R. S. DAVIS, *Measurement of Dynamic Plastic Flow Properties Under Uniform Stress*, Symposium on the Dynamic Behavior of Materials, ASTM Special Publication, no. 336, 1963.
- [2] F. I. NIORDSON, *A unit for testing Materials at High Strain Rates*, Experimental Mechanics, January 1965.
- [3] J. R. ASAY, L. M. BARKER, *Interferometric measurement of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity*, Journal of Applied Physics, vol. 45, no. 6, 1974.
- [4] H. C. WALLING, M. J. FORRESTAL, *Elastic-Plastic Expansion of 6061-T6 Aluminum Rings*, AIAA Journal, vol. 11, no. 8, 1973.
- [5] D. E. GRADY, D. A. BENSON, *Fragmentation of metal Rings by Electromagnetic Loading*, Experimental Mechanics, 23, 1983.
- [6] W. H. GOURDIN, *Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test*, J. Appl. Phys., 65, 2, 1989.
- [7] R. BAKER, *Ring fragmentation predictions using the Gurson model with material stability conditions as failure criteria*, International Journal of Solids and Structures, 39, 2002.
- [8] S. MERCIER, A. MOLINARI, *Analysis of multiple necking in rings under rapid radial expansion*, International Journal of Impact Engineering, 30, 2004.
- [9] N. TRIANTAFYLIDIS, J. R. WALDENMYER, *Onset of necking in electro-magnetically formed rings*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 52, 2004.
- [10] F. ZHOU, J. F. MOLINARI, K. T. RAMESH, *Analysis of brittle fragmentation of an expanding ring*, Computational Materials Science, 37, 2006.
- [11] A. RUSINEK, R. ZAERA, *Finite element simulation of steel ring fragmentation under radial expansion*, International Journal of Impact Engineering, 34, 2007.
- [12] D. LANDEN, S. SATAPATHY, D. SURLS, *Measurement of High-Strain-Rate Adiabatic Strength of Conductors*, 13<sup>th</sup> Electromagnetic Launch Technology Symposium, 2006.
- [13] S. SATAPATHY, D. LANDEN, *Expanding ring experiments to measure high-temperature adiabatic properties*, International Journal of Impact Engineering, 33, 2006.
- [14] W. H. GOURDIN, S. L. WEINLAND, R. M. BOLING, *Development of the electro-magnetically launched expanding ring as a high-strain-rate test technique*, Rev. Sci. Instrum., 60(3), 1989.
- [15] R. PANOWICZ, W. WŁODARCZYK, J. JANISZEWSKI, *Wybór związku konstytutywnego do analizy zachowania się materiału pierścienia rozpęzanego impulsowym silnym polem elektromagnetycznym*, Biul. WAT, 56, 4, 2007, 201-222.

J. JANISZEWSKI, W. PICHOLA

### Development of electromagnetic ring expansion apparatus for high-strain-rate test

**Abstract.** The structure of the experimental set-up for electromagnetic ring expansion and investigation results of its electric properties are described in our paper. While earlier expanding ring apparatus were usually equipped with shaped-charge or ignitron switches, we propose that impulse high-voltage thyristors be used as a switch to discharge a capacitor bank. Furthermore, the preliminary results of the copper ring fragmentation properties are presented for different initial charges of a capacitor bank (0.5–2 kV). On the basis of our preliminary record data of the ring motion for expansion at 2 kV we estimated the radial ring velocity as exceeding 200 m/s.

**Keywords:** high-strain-rate material properties, electromagnetic expanding ring test

**Universal Decimal Classification:** 669.018.2

