

# Impulsy elektryczne wielkiej mocy z subnanosekundowym czasem narastania

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące generacji wysokonapięciowych impulsów elektrycznych wielkiej mocy z subnanosekundowym czasem narastania. Opisano parametry od których zależy czas trwania zbrocza narastającego impulsu. Można go regulować za pomocą zmiany wartości dwóch składowych zależnych od indukcyjności i rezystancji klucza załączającego. Efektywnym i najprostszym w realizacji sposobem jest zmiana szybkości narastania napięcia prowadząca do wzrostu natężenia pola elektrycznego w przerwie międzyelektrodowej.

**Abstract.** The paper presents basics informations about subnanosecond rise time high power pulse generating. Described parameters witch determine impulse rise time. It can be regulated by changing two components dependents on switch inductance and resistance. The most effective and the easiest way is to change voltage slew rate which leads to an increase electric field strength. (High power electric pulses with subnanosecond rise time).

**Słowa kluczowe:** Impuls elektryczny, subnanosekundowy czas narastania, iskiernik włączający, "ostrzenie impulsu".

**Keywords:** Electric pulse, subnanoseconds rise time, spark gap switch, "pulse sharpening".

doi:10.12915/pe.2014.10.20

## Wstęp

W dobie technologii opartej na zminiaturyzowanych układach elektronicznych wrażliwych na różnego rodzaju zaburzenia elektromagnetyczne problematyka impulsów szerokopasmowych nabiera coraz większego znaczenia. Impulsy elektryczne wielkiej mocy z subnanosekundowym czasem narastania powstają np.: podczas prób jądrowych na dużych wysokościach czy też przy rozbłyskach słonecznych. Są także wytwarzane za pomocą specjalnych generatorów [1].

Generatory wytwarzające impulsy z subnanosekundowym czasem narastania wykorzystują różne rodzaje kluczy załączających takie jak: krytron, tranzystor lawinowy, kontaktron itp. Pozwalają one na uzyskanie impulsów o wartościach szczytowych do kilku kilowoltów.

W zakresie wyższych napięć (dziesiątki, setki kilowoltów) najskuteczniejszym rozwiązaniem jest użycie iskierników. Iskierniki wykorzystywane są przez nanosekundowe generatory impulsów wielkiej mocy do tzw. "ostrzenia" impulsu. Formowanie impulsów w tych generatorach jest silnie uzależnione od procesów zachodzących w łuku plazmowym. Początkowa faza rozładowania-od przyłożenia impulsu napięciowego do początku zapalenia się kanału plazmowego-determinuje opóźnienie czasowe oraz rozrzut działania iskiernika. Czas trwania zbrocza narastającego impulsu napięciowego zależy od szybkości tworzenia się wysokoprzewodzącego kanału plazmowego w przerwie międzyelektrodowej.

Ograniczenie częstotliwości działania dla stabilnej pracy generatora jest określone przez czas jaki iskiernik potrzebuje na odzyskanie swojej wytrzymałości elektrycznej. Typowa wartość częstotliwości układów z gazowymi dielektrykami jest nie większa niż 100Hz [2].

Ponadto przy wykorzystaniu iskierników należy uwzględnić czynniki mające istotny wpływ na napięcie przebicia dielektryka znajdującego się pomiędzy elektrodami.

Jednym ze sposobów testowania odporności współczesnych urządzeń elektrycznych i elektronicznych na szerokopasmowe, elektromagnetyczne narażenia promieniowane jest poddanie ich działaniu impulsowego pola elektromagnetycznego o bardzo krótkim czasie narastania i krótkim czasie trwania.

## Szerokopasmowy impuls wielkiej mocy

Widmo (szerokość) pasma impulsu jest określone przez zbrocza (narastające i opadające) oraz przez czas trwania. Czas trwania impulsu decyduje o niskoczęstotliwościowej części widma, natomiast czas trwania zbrocza narastającego i opadającego o części wysokoczęstotliwościowej.

## Czas narastania impulsu

Czas narastania impulsu  $\tau_{tot}$  jest sumą dwóch składowych składowej  $\tau_L$  - zależnej od indukcyjności oraz składowej  $\tau_R$  - zdeterminowanej przez rezystancję w pierwszej fazie przewodzenia iskiernika [4]:

$$(1) \quad \tau_{tot} = (\tau_L^2 + \tau_R^2)^{\frac{1}{2}} \text{ [ns]}$$

Wartość składowej zależnej od indukcyjności wyznacza się ze wzoru:

$$(2) \quad \tau_L = \frac{L}{Z} \text{ [ns]}$$

gdzie:  $Z$  – impedancja obwodu,  $L$  – indukcyjność kanału plazmowego

Oszacowanie dokładnej wartości indukcyjności iskiernika jest niemożliwe (zmienia się ona w czasie), można ją jednak aproksymować za pomocą formuły opisującej indukcyjność obwodu cylindrycznego (cienki cylindryczny przewód, leżący na osi metalowej rury) [4]:

$$(3) \quad L = l \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) = 2l \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) \approx 14l \text{ [nH]}$$

gdzie:  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,  $r_i$ ,  $r_a$  – promienie odpowiednio wewnętrzny (promień przewodu) i zewnętrzny (promień rury),  $l$  – długość kanału plazmowego w cm.

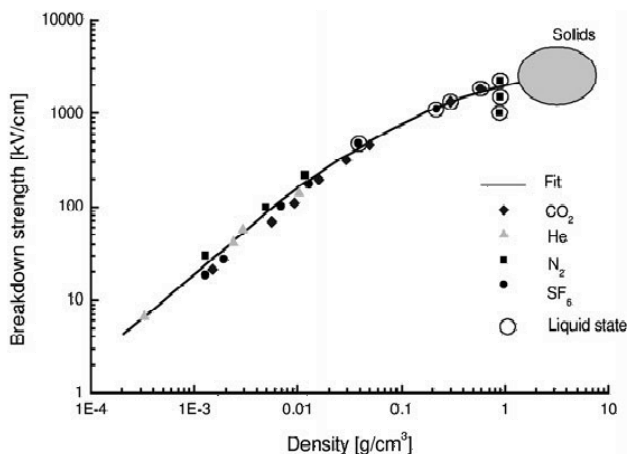
Dla iskierników gazowych składową związaną z rezystancją w początkowej fazie przewodzenia opisuje wzór [4]:

$$(4) \quad \tau_R = \frac{88}{\sqrt[3]{ZE_p^4}} \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} [\text{ns}]$$

gdzie:  $E_p$  – pole elektryczne przy którym następuje przebicie dielektryka w MV/m,  $Z$ - impedancja obwodu,  $\rho$  – gęstość ośrodka,  $\rho_0$  - gęstość ośrodka w warunkach normalnych

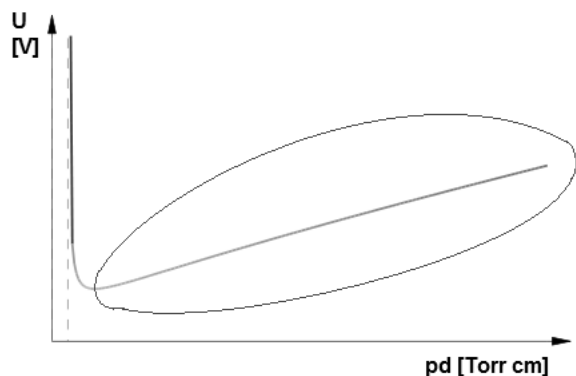
Jak wynika ze wzoru (4) zmianę wartości  $\tau_R$ , a co za tym idzie całkowitego czasu narastania, można uzyskać na dwa sposoby: przez zmianę gęstości ośrodka lub zmianę natężenia pola elektrycznego.

W pierwszej metodzie wykorzystywana jest zależność wytrzymałości dielektryka gazowego od zmiany gęstości ośrodka. Zależność tą przedstawia rysunek 1.



Rys.1. Wpływ gęstości ośrodka na jego wytrzymałość elektryczną [4]

Przyjmując liniową zależność natężenia pola elektrycznego  $E_p$  od gęstości gazowego ośrodka  $\rho$  – prawa gałąź krzywej Paschena (rys.2).



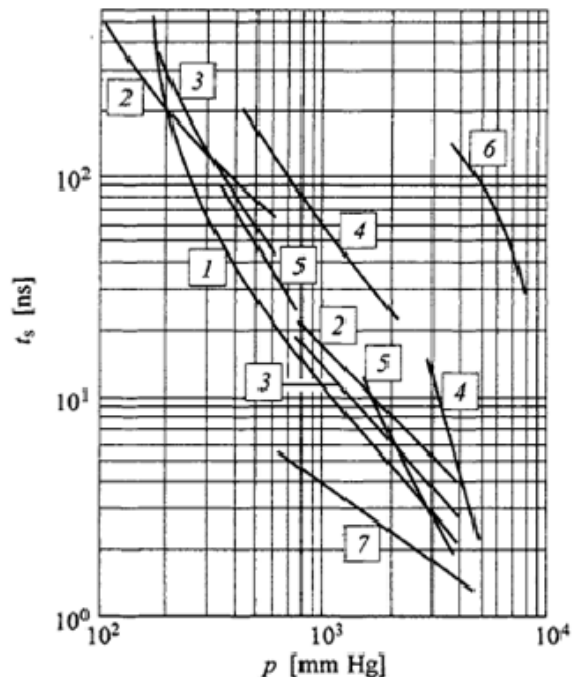
Rys.2. Krzywa Paschena

Wykorzystując wyrażenie (4), stosunek zmian  $\tau_R$  do  $\rho$  można zapisać w następującej postaci:

$$(5) \quad \tau_R \sim \frac{\rho^{\frac{1}{2}}}{\rho^{\frac{5}{3}}} \sim \rho^{-\frac{5}{6}}$$

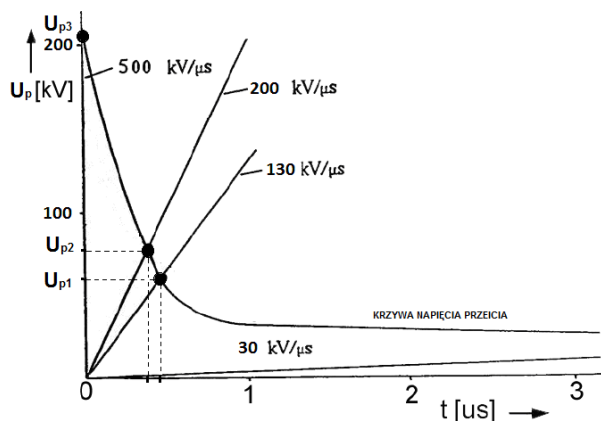
gdzie:  $\rho$  – gęstość ośrodka.

Aby uzyskać impulsy o czasie narastania mniejszym niż 1ns należy wytworzyć ciśnienie o wartościach 5-10MPa [3]. Zależność czasu trwania zbrocza narastającego od ciśnienia dla wybranych gazów przedstawia rysunek 3 [3].



Rys.3. Wpływ ciśnienia przykładowych gazowych ośrodków na czas narastania impulsu (1 – powietrze, 2 – CO<sub>2</sub>, 3 – azot, 4 – wodór, 5 – freon, 6 – hel, 7 – argon) [3]

O ile regulacja czasu narastania impulsu przez zmianę ciśnienia gazowego ośrodka nastęca wielu problemów, zarówno konstrukcyjnych jak i eksploatacyjnych, tak regulacja czasu narastania za pomocą pola elektrycznego jest stosunkowo prosta i efektywna. Opiera się ona na fakcie, iż dla danej geometrii iskiernika i ciśnienia gazu, wraz ze wzrostem szybkości narastania napięcia rośnie wartość napięcia przebicia  $U_p$ . Przedstawia to rysunek 4 [6].



Rys.4. Wpływ szybkości narastania napięcia na napięcie przebicia ośrodka, gdzie: 30, 130, 200 oraz 500 kV/ $\mu$ s – szybkości narastania napięcia

Zamierzony czas trwania impulsu uzyskuje się przez odpowiedni dobór parametrów RC obwodu.

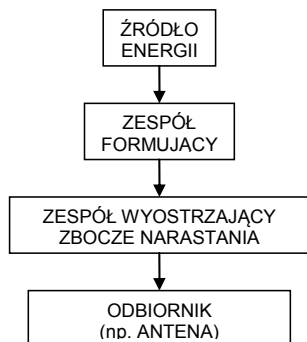
Dla impulsów o czasie trwania setek nanosekund i zbroczach subnanosekundowych podstawowa energia jest przenoszona w zakresie częstotliwości od kilku MHz do kilku GHz.

#### Budowa układu do wytwarzania impulsów wielkiej mocy o subnanosekundowym czasie narastania

Generator impulsów wielkiej mocy o subnanosekundowym czasie narastania składa się z

czterech podstawowych zespołów (rys.5): źródła energii, układu formującego impuls, urządzenia wyostrzającego front narastania oraz odbiornika.

Źródłem energii jest generator udarów napięciowych (rys.6) wytwarzający impuls o mikrosekundowym czasie



Rys.5. Uproszczony schemat blokowy układu do wytwarzania impulsów elektrycznych wielkiej mocy o subnanosekundowym czasie narastania

Zespół formujący składa się z obwodu skupionego, którego najważniejszym elementem jest kondensator pełniący funkcję magazynu energii. Pozwala to na jej

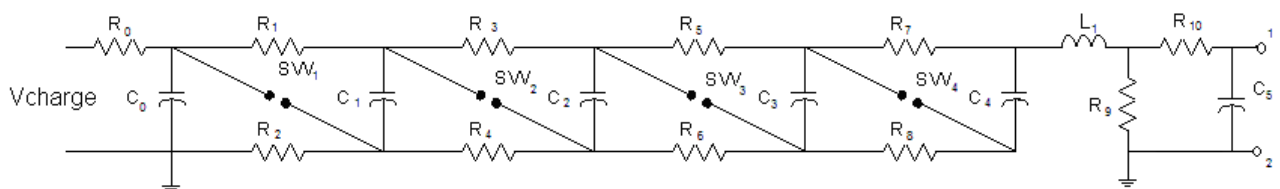
"skompresowanie" a co za tym idzie na skrócenie czasu trwania impulsu do kilkuset nanosekund. Budowę elementu formującego impuls przedstawia rysunek 7.

Zadaniem trzeciego elementu (rys.8) jest wyostrenie frontu narastania do wartości mniejszej niż 1 ns.

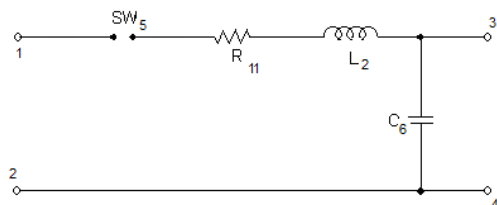
Układ ten opiera się na szybkim kluczu zaostrażającym. Do tego celu można wykorzystać na przykład iskierniki cieczkowe, które w przeciwieństwie do iskierników gazowych wysokociśnieniowych pracują przy ciśnieniu atmosferycznym, co upraszcza ich budowę i ułatwia eksploatację. Iskierniki te charakteryzują się również mniejszą indukcyjnością niż iskierniki gazowe, co przyczynia się do skrócenia czasu trwania zbocza narastającego.

Istotną wadą iskierników cieczkowych jest ich niestabilność pracy (degradacja ośrodka izolacyjnego), mogą więc być stosowane jedynie przy pracy z niewielkimi częstotliwościami.

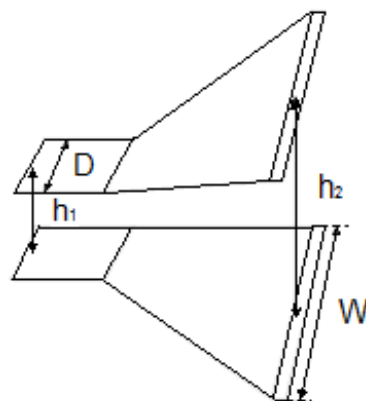
Odbiornikiem generatora może być antena V-kształtna (rys. 9) o impedancji rzędu 200  $\Omega$ . W tym układzie pojemność będąca źródłem impulsu powinna posiadać wartość około 1 nF. Antena pełni dwie funkcje. Po pierwsze jest nadajnikiem emitującym impulsowe pole elektromagnetyczne w kierunku badanego obiektu, po drugie pełni funkcję linii transmisyjnej [6].



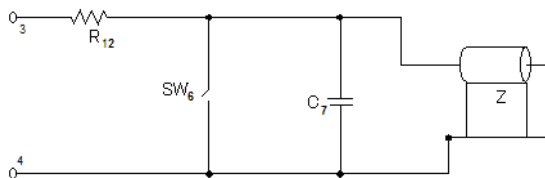
Rys.6. Uproszczony schemat zastępczy generatora udarów napięciowych (SW<sub>1</sub>-SW<sub>4</sub> – iskierniki międzystopniowe, C<sub>0</sub> do C<sub>4</sub> – kondensatory kolejnych stopni, R<sub>0</sub> – rezystor ładowający, od R<sub>1</sub> do R<sub>8</sub> – rezystory międzystopniowe, L<sub>1</sub> – indukcyjność przewodów, C<sub>5</sub> – pojemność formująca impuls, R<sub>9</sub> – rezystor rozładowujący)



Rys.7. Uproszczony schemat układu formującego impuls (SW<sub>5</sub> – iskiernik załączający układ formujący impuls, L<sub>2</sub> – indukcyjności pasywnicze, R<sub>11</sub> – rezystor ładowający, C<sub>6</sub> – kondensator - magazyn energii)



Rys.9. Geometria przykładowej anteny (antena V-kształtna), gdzie: h<sub>1</sub> – najmniejsza odległość pomiędzy płytami, h<sub>2</sub> – największa odległość, D – najmniejsza szerokość obu płyt, W – największa szerokość obu płyt



Rys.8. Uproszczony schemat układu wyostrzającego czoło narastania impulsu (SW<sub>6</sub> – iskiernik (klucz) wyostrzający, Z – odbiornik-nieizolowana płaska linia transmisyjna, pełniąca funkcję anteny, R<sub>12</sub> – rezystor ładowający, C<sub>7</sub> – pojemność będąca źródłem impulsu)

### Urządzenie do pomiaru zmiennego pola elektromagnetycznego

Układ do pomiaru szybkozmiennego pola elektromagnetycznego składa się z małej unipolarnej anteny, nadajnika optycznego, światłowodu, odbiornika optycznego oraz oscyloskopu. Impulsowe pole elektromagnetyczne, wyemitowane przez antenę, przekształcane jest na impuls elektryczny. Nadajnik optyczny przekształca sygnał elektryczny na optyczny.

Sygnal optyczny przekazywany jest światłowodem do odbiornika optycznego który ponownie przekształca go na sygnał elektryczny. Zarówno odbiornik optyczny jak i oscyloskop muszą być chronione. Należy je więc zamknąć w metalowej szafie na czas pomiaru. Stosując technologię światłowodową do przesyłu sygnału unika się indukowania się napięć wewnątrz przewodów doprowadzających sygnał z anteny do oscyloskopu oraz zniekształceń tego sygnału.

#### Podsumowanie

Wytwarzanie impulsów wielkiej mocy z subnanosekundowym czasem narastania jest złożonym zadaniem uzależnionym od wielu czynników i zjawisk.

Odpowiedni dobór wartości elementów układu gwarantuje osiągnięcie założonych parametrów impulsów w tym czasie narastania, opadania i trwania impulsu oraz ich powtarzalności.

Pomiar impulsowego szybkozmiennego pola elektromagnetycznego o dużym natężeniu niesie za sobą pewne ograniczenia i trudności takie jak indukowanie się napięć w przewodach pomiarowych oraz ścieżkach na płytkach drukowanych elektronicznych układów pomiarowych.

Dokładne odwzorowanie wysokoczęstotliwościowej części sygnału wymaga odpowiednio szybkich kart pomiarowych o dużej częstotliwości próbkowania.

Kolejnym krokiem jest opracowanie metod pomiarowych szybkozmiennego pola elektromagnetycznego o dużym natężeniu obciążonych jak najmniejszym błędem oraz skutecznych sposobów ochrony urządzeń elektronicznych przed skutkami jego działania.

#### LITERATURA

- [1] *PN-EN 61000-2-9:01.2002* (1996), Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 2-9. Środowisko – Opis środowiska HEMP – zaburzenia promieniowane. Podstawowa publikacja EMC
- [2] Г.А. Месяц Импульсная энергетика и электроника / Наука, (2004), 704 с. ISBN 5-02-033049-3
- [3] Mesyats Gennady A, Pulsed power, ISBN 0-306-48654-7, Springer Science +Business Media, Inc., 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, (2005)
- [4] Bluhm H., „Pulsed Power Systems”, Springer - Verlag Berlin Heiderberg, (2006), ISBN-13 978-3-540-26137-7
- [5] Maliczewski D., „Wyładowania w gazach pod niskim ciśnieniem”, *Stupsk*, (2002)
- [6] Sowa A., „Iskierniki gazowe podstawowymi elementami ograniczania przepięć w systemach przesyłu sygnału”, ([www.ochrona.net.pl](http://www.ochrona.net.pl))
- [7] Korotkov S. V., Aristov Yu. V., Voronkov V. B., „A Generator of HighVoltage Nanosecond Pulse with a Subnanosecond Rise Time”, *springer Instruments and Experimental Techniques* Volume 53, Issue 2, 230-232
- [8] Liu-hui Zhang, Li-hua Shi, Yan-xin Li, Ying-hui Zhou, Quing Si, „A Compact High Power Pulsed Field Generator with Fast Rise Time”, *Environmental Electromagnetics (CEEM)*, 2012 6th Asia-Pacific Conference on, *IEEE* 10.1109/CEEM.2012.6410609, (2012)
- [7] Kekez M. M., Simple sub-50-ps rise-time high voltage generator, *American Institute of Physics*, AIP Journals & Magazines, Review of Scientific Instruments *IEEE* Volume: 62 , Issue: 12, 2923 - 2930, (1991)
- [8] <http://www.futurescience.com/emp.html>

---

**Autorzy:** mgr inż. Paweł Szczupak, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, E-mail: [pszczup@prz.edu.pl](mailto:pszczup@prz.edu.pl)