

Paweł KOBUS¹, Michał MOLAS², Marcin SZEWCZYK³
ORCID: ¹0009-0006-0902-8896, ²0000-0001-5954-8335, ³0000-0003-3699-5559
DOI: 10.15199/48.2025.10.31

Badania urządzeń, aparatury elektroenergetycznej i osprzętu aparaturowego z użyciem impulsowych generatorów prądowych

Testing of electrical equipment, devices and apparatus accessories using pulse current generators

¹ inż. Paweł Kobus, Instytut Energetyki – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, e-mail: pawel.kobus@ien.com.pl
² dr inż. Michał Molas, Instytut Energetyki – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, e-mail: michal.molas@ien.com.pl
³ dr hab. inż. Marcin Szewczyk, prof. uczelni, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: marcin.szewczyk@pw.edu.pl

Adres do korespondencji: pawel.kobus@ien.com.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem i budową generatorów udarów prądowych stosowanych w badaniach odporności urządzeń elektroenergetycznych na działanie impulsów prądowych. Omówiono zasady generowania udarów o kształcie wykładniczym oraz prostokątnym, wskazując elementy konstrukcyjne mające kluczowy wpływ na parametry impulsów. Omówiono zagadnienie doboru parametrów układu probierczego w celu zapewnienia zgodności charakterystyk udarów z wymaganiami normatywnymi. Opisane w artykule rozwiązania umożliwiają realizację badań zgodnie z wymaganiami określonymi w odpowiednich dokumentach normalizacyjnych.

Słowa kluczowe: generatory prądowe, badania, próby typu, urządzenia elektroenergetyczne

Abstract: The paper discusses the design and construction aspects of current impulse generators used for testing the immunity of power equipment to current impulses. It explains the principles of generating impulses with exponential and rectangular waveforms, highlighting construction elements that have a key influence on impulse parameters. The selection of test circuit parameters to ensure compliance of impulse characteristics with normative requirements is also described. The solutions presented in the paper enable the execution of tests in accordance with the requirements specified in the relevant standardization documents.

Keywords: current generators, current impulse, testing, power components

Wstęp

Rozwiązania konstrukcyjne generatorów udarów prądowych oraz zakres prowadzonych z ich użyciem badań wynikają z wymagań normalizacyjnych dotyczących urządzeń, osprzętu i aparatury elektroenergetycznej. Wymagania te w zakresie badań wielkoprądowych zostały określone w dokumentach normalizacyjnych, obejmujących techniki pomiarowe, układy probiercze oraz współpracujące z nimi systemy pomiarowe. Badania te wykonywane są w laboratoriach wysokonapięciowych i wielkoprądowych, takich jak laboratorium EWM Instytutu Energetyki – Państwowy Instytut Badawczy [1], Laboratorium Badawczym Aparatury Rozdzielczej Łukasiewicz-Institut Elektrotechniki [21], czy akredytowanych

laboratoriach takich jak laboratorium DEHN [2], jak również w nieakredytowanych laboratoriach akademickich, takich jak Laboratorium Zwarciove Politechniki Warszawskiej [3].

Udary prądowe w technice wysokich napięć i wielkich prądów stosuje się przede wszystkim w badaniach ograniczników przepięć, kompatybilności elektromagnetycznej oraz w próbach wytrzymałości udarowej [1, 4]. Generatory prądowe umożliwiają również odwzorowanie prądów występujących wskutek przepięć łączeniowych oraz w stanach awaryjnych sieci elektroenergetycznej.

Przykładowo, w odniesieniu do badań ograniczników przepięć wykorzystywane są udary prądowe o parametrach: wartość szczytowa 100 kA, czasy czoła

i grzbiecie 8/20 us [4]. Testy cyklu pracy ograniczników przepięć można wykonywać prądem udarowym 8/20 us w przypadku sieci i instalacji prądu przemiennego lub też prądem udarowym 8/20 us nałożonym na prąd stały, co uzyskiwane jest w układzie generatora prądowego wraz z zespołem prostownika podłączonego na wyjście transformatora wielkoprądowego prądu przemiennego.

Innym ważnym obszarem, w którym wykorzystywane są badania udarami prądowymi, jest ochrona odgromowa [2]. Przykładowo, oddziaływania prądów wyładowań piorunowych w linii napowietrznej lub wyładowań tzw. pobliskich, odwzorowywane są pomiarowo przy użyciu udarów prądowych o przykładowych parametrach: wartość szczytowa do 400 kA, czasy szczytu i grzbiecia 10/350 us [2].

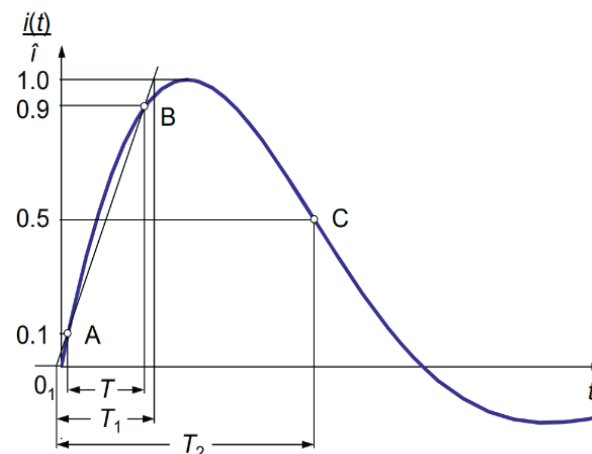
Dokumenty normalizacyjne określające zakres badań z użyciem generatorów prądowych obejmują w szczególności [2]: opisane w normie IEC 61643-11 [5] badania odporności na prąd wyładowczy ograniczników przepięć, opisane w normie IEC 62305-1 [6] badania odporności instalacji obiektów budowlanych na wyładowania prądem piorunowym, opisane w normie IEC 61000-4-5 [7] badania odporności osprzętu elektrycznego i elektronicznego na przepięcia spowodowane wyładowaniami piorunowymi, czynnościami łączeniowymi oraz stanami awaryjnymi sieci elektroenergetycznej. Z kolei norma IEC 62305-1 [6] określa udary wielokrotne składające się z kilku udarów prądowych, definiując parametry tych udarów, jak i odstępy czasu między poszczególnymi udarami. Innym obszarem stosowania badań udarami prądowymi są realizowane przez Instytut Fizyki Plazmy [8] badania elementów statków powietrznych w aspekcie ich odporności na bezpośrednie wyładowania piorunowe.

W niniejszym artykule przedstawiono zasady konstrukcji generatorów prądowych, istotne aspekty techniczne związane z ich funkcjonowaniem oraz wybrane zagadnienia dotyczące badań wykorzystujących udary prądowe.

Generatory prądowe udarów wykładniczych

Do wykonywania badań rozwojowych i prób typu urządzeń, aparatury elektroenergetycznej i osprzętu aparaturowego, wykorzystywane są dwa podstawowe kształty udarów prądowych: wykładniczy i prostokątny.

W przypadku *udarów wykładniczych* (o przebiegu oscylacyjnym silnie tłumionym), podobnie jak przy udarach napięciowych łączeniowych i piorunowych,



Rys. 1. Przebieg wykładniczego udaru prądowego; sposób określania parametrów udaru I_m , T_1 oraz T_2 opisano w tekście

jego kształt określa się za pomocą wartości szczytowej I_m , czasu czoła T_1 oraz czasu do półszczytu T_2 określającego grzbiet udaru. Do podstawowych parametrów udaru prądowego zalicza się również całkowity ładunek Q oraz całkę Joule'a $\int P t$ określającą energię wydzieloną w badanym obiekcie podczas przepływu prądu udarowego.

Na rys.1. przedstawiono przebieg wykładniczego udaru prądowego. W celu wyznaczenia czasu czoła T_1 określa się punkty odpowiadające wartościom $0,1 I_m$ oraz $0,9 I_m$. Następnie, po poprowadzeniu prostej przez te dwa punkty, wyznacza się odległość od miejsca przecięcia tej prostej z osią czasu t do punktu, w którym przecina ona poziom $y = I_m$, wówczas uzyskany wynik to czas T_1 . Natomiast czas T_2 odpowiada odcinkowi od przecięcia wspomnianej prostej z osią czasu do punktu, w którym wartość udaru obniża się do $0,5 I_m$.

Do wytwarzania wykładniczych udarów prądowych wykorzystuje się układ o schemacie połączeń podobnym do tego, jaki stosowany jest w generatorach Marxa używanych w próbach napięciowych (rys. 2) [9]. W przypadku generatorów prądowych nie wykorzystuje się stosowanej w generatorach Marxa pojemności kształtującej czoło udaru (zwyczajowo oznaczanej przez C_2 [9]), a zamiast tego stosuje się pojemność główną C (rys. 2), która jest znacznie większa niż pojemność kształtująca grzbiet udarów napięciowych w przypadku generatorów Marxa.

Rozładowanie pojemności głównej generatora C odbywa się poprzez sumaryczną indukcyjność L i rezystancję R (rys. 2). Indukcyjność w obwodzie rozładowczym składa się z indukcyjności wewnętrznej L_w generatora będącej sumą indukcyjności poszczególnych elementów generatora, oraz indukcyjności zewnętrznej L_d wynikającej z połączeń pomiędzy iskiernikiem a obiektem badanym. Analogicznie, su-

maryczna rezystancja w obwodzie rozładowczym obejmuje rezystancję wewnętrzną R_w , zewnętrzną R_d oraz rezystancję obiektu badanego R_o .

W następstwie rozładowania objętości w powyższym układzie generowany jest przebieg oscylacyjny silnie tłumiony, którego kształt zależy od parametrów obwodu RLC . Znaczącą kwestią w praktycznej realizacji tego procesu jest występowanie prądu tzw. *rewersyjnego*. Definiuje się go jako wartość szczytową oscylacji nałożonej na prąd udarowy po zmianie jego biegunowości [10]. Zgodnie z normą IEC 62475 [4], wartość prądu rewersyjnego musi zostać ograniczona i nie może przekraczać 30% wartości szczytowej udaru prądowego I_m . Jest to spowodowane możliwością uszkodzenia obiektu badanego na skutek przyjęcia dodatkowego ładunku przepływającego po zmianie biegunowości [10] lub kondensatorów rozładowczych z uwagi na występowanie wyładowań niezupełnych na końcówkach ich okładek [11].

Projektowanie generatorów prądowych wymaga wyznaczenia parametrów generatora (napięcia źródłowego oraz parametrów RLC na rys. 2) umożliwiających uzyskanie przebiegów udarów o parametrach spełniających wymagania odpowiednich norm (w przypadku udarów wykładniczych są to czasy czoła i do półszczytu, a także wartość szczytowa udaru). Powiązanie parametrów udarów z parametrami generatora uzyskuje się wykonując obliczenia analityczne, a przykładowy sposób wykonania tych obliczeń jest przedstawiony np. w pracy [20]. Postać końcowych wzorów zależy od tego, czy przebieg udaru ma być krytycznie tłumiony, oscylacyjny przetłumiony lub niedotłumiony. Poniżej przedstawiono wzory opisujące parametry udaru prądowego, niezależnie od podziału na wymienione wyżej kategorie [9].

Proces rozładowania pojemności C po zapłonie iskiernika I_w w obwodzie LR (rys. 2) opisany jest równaniem:

$$(1) \quad L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + iR + U_o(i) = U,$$

gdzie:

L – sumaryczna indukcyjność obwodu,

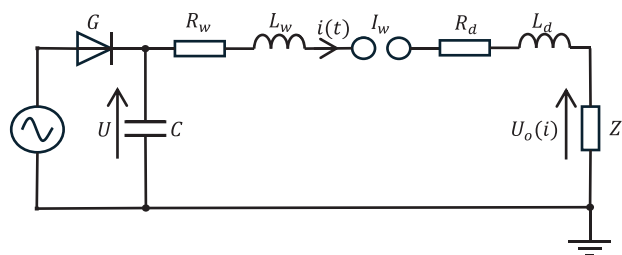
R – sumaryczna rezystancja obwodu,

$i(t)$ – przebieg prądu,

$U_o(i)$ – charakterystyka prądowo-napięciowa badanego obiektu.

W przypadku gdy funkcja $U_o(i)$ ma charakter liniowy, tzn. gdy można przyjąć, że $U_o(i) = i \cdot R_o$, wzór (1) można przedstawić w postaci:

$$(2) \quad LC \frac{d^2i}{dt^2} + RC \frac{di}{dt} + i = 0$$



Rys. 2. Schemat obwodowy układu generatora prądowego do wytwarzania udarów prądowych o przebiegu *wykładniczym* wg rys. 1 (oscylacyjnym silnie tłumionym): G – układ wyprostowujący napięcie, U – napięcie na pojemności głównej, C – pojemność główna generatora, L_w – indukcyjność wewnętrzna generatora, R_w – rezystancja wewnętrzna generatora, R_d – rezystancja zewnętrzna, I_w – iskiernik inicjujący rozładowanie kondensatorów, L_d – indukcyjność zewnętrzna, Z_o – impedancja obiektu badanego, $U_o(i)$ – napięcie na badanym obiekcie

Jeśli następnie wprowadzić parametr pomocniczy:

$$(3) \quad K = \frac{4L}{R^2C},$$

to dla $K > 1$ otrzymuje się przebieg udaru prądowego postaci:

$$(4) \quad i(t) = \frac{U}{Z} \exp(-\delta t) \frac{\sin \Omega t}{\sin \sigma},$$

gdzie:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{KLC}}, \quad \Omega = \delta \sqrt{K-1}, \quad \sigma = \arctg \sqrt{K-1}, \quad Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

są współczynnikami we wzorze (4) wprowadzonymi w celu uproszczenia zapisu tego wzoru.

W ten sposób możliwe jest analityczne wyznaczenie parametrów udaru prądowego:

$$(5) \quad I_m = \frac{U}{Z} f_1(K),$$

$$(6) \quad T_1 = \sqrt{LC} f_2(K),$$

$$(7) \quad \frac{T_1}{T_2} = f_3(K).$$

Wykresy funkcji $f_1(K)$, $f_2(K)$, $f_3(K)$ mogą być aproksymowane w zakresie $0,4 \leq K \leq 20$ wyrażeniami [9]:

$$(8) \quad f_1(K) = 0,124 \ln K + 0,374,$$

$$(9) \quad f_2(K) = 0,140 \ln K + 0,710,$$

$$(10) \quad f_3(K) = 0,147 e^{-0,89 \ln K} + 2,3.$$

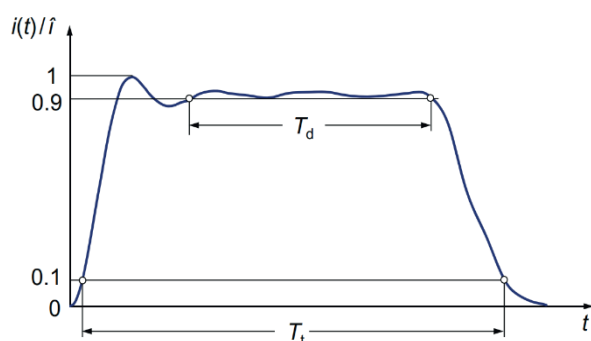
Przedstawiony powyżej sposób opisu ma również tę zaletę, że dzięki wprowadzeniu pomocniczego

parametru K można ocenić, czy w generatorze o założonych wartościach parametrów RLC spełnione zostanie wymaganie ograniczenia wartości prądu rewersyjnego do poziomu poniżej 30% I_m . Nastąpi to dla $K \leq 4,8$. Parametr K zależy od trzech wielkości: indukcyjności układu, rezystancji układu i pojemności głównej generatora. Po przekroczeniu wartości 4,8 dla parametru K następuje albo dominacja indukcyjności, albo niewystarczające tłumienie udaru, co prowadzi do wzrostu wartości prądu rewersyjnego.

Generatory prądowe uderów prostokątnych

Udary prostokątne stosuje się między innymi w próbach ograniczników przepięć, umożliwiając odwzorowanie obciążenia stosu zmiennooporowego prądem rozładowania linii elektroenergetycznej naładowanej do najwyższego napięcia roboczego [9]. Celem jest weryfikacja zdolności absorpcji energii ogranicznika w warunkach silnej koncentracji pola elektrycznego, na przykład podczas przepięcia łączeniowego [12, 13].

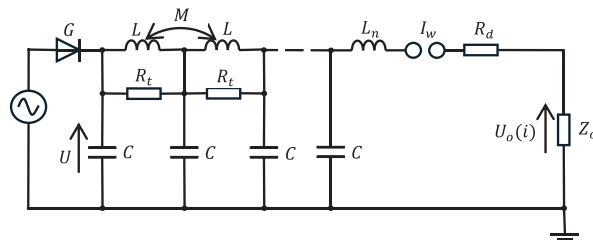
Kształt uderów prostokątnych charakteryzuje się poprzez (rys. 3): wartość szczytową prądu uderowego I_m , umowny czas trwania uderu prostokątnego T_d , w którym wartość chwilowa natężenia prądu jest zawsze większa od $0,9 I_m$, oraz umowny całkowity czas trwania T_t , w którym wartość chwilowa natężenia prądu jest większa od $0,1 I_m$ z warunkiem, że $T_t \leq 1,5 T_d$. Tak jak w przypadku uderu wykładniczego, również uder prostokątny można dodatkowo scharakteryzować całkowitym ładunkiem Q oraz całką Joule'a Pt .



Rys. 3. Przebieg *prostokątnego* udaru prądowego; sposób określania parametrów udaru I_m , T_d oraz T_r opisano w tekście

Do wytwarzania prostokątnych uderów prądowych wykorzystuje się generatory oparte na zasadzie rozładowania linii długiej, złożonej z połączonych ogniw LC (rys. 4). Liczba tych ogniw zależy od oczekiwanej wartości szczytowej udaru oraz oczekiwanej wartości jego stromości.

Zasada działania generatora polega w tym przypadku na naładowaniu do napięcia U kondensatorów C połączonych równolegle, a następnie po zapłonie iskiernika I_w rozładowaniu tych kondensatorów przez rezystancję końcową R , stanowiącą sumę rezystancji dodatkowej R_d oraz rezystancji obiektu badanego R_o . Do tłumienia oscylacji na początku i na końcu udaru wykorzystuje się oporniki tłumiące R_t .



Rys. 4. Schemat obwodowy układu generatora prądowego do wytwarzania udarów prądowych o przebiegu *prostokątnym* wg rys. 3: U – napięcie na kondensatorach w chwili inicjacji udaru prostokątnego, L , C – indukcyjności i pojemności pojedynczego ogniwa generatora, L_n – indukcyjność n -tego ogniwa, M – indukcyjność wzajemna sąsiednich ogniw, R_t – opornik tłumiący, R_d – rezystancja dodatkowa, Z_0 – impedancja badanego obiektu

Podobnie jak w przypadku wykładniczych uderów prądowych, również przy uderach prostokątnych występuje zjawisko prądu rewersyjnego. Zgodnie z normą IEC 62475 [4] jego wartość nie powinna przekraczać 10% wartości szczytowej uderu prądowego I_m . Dla uniknięcia przekroczenia dopuszczalnej wartości prądu rewersyjnego należy spełnić tzw. warunek dopasowania, pozwalający na uzyskanie dopasowania falowego generatora do obiektu badanego, a tym samym uniknięcie niekontrolowanego odbijania się fal prowadzącego do zwiększenia wartości szczytowej uderu w punkcie nieciągłości impedancji falowej:

$$(11) \quad 0,8 \sqrt{\frac{L}{C}} \leq R \leq 1,2 \cdot \sqrt{LC}.$$

Ponieważ w obwodzie występują indukcyjności, aby zapewnić dopasowanie falowe generatora do badanego obiektu, spodziewane jest, że geometria obwodu powinna odpowiadać wymiarowi elektrycznemu fali udarowej.

W celu uniknięcia częstych zmian rezystancji dodatkowej dla różnych obiektów badanych, tak aby zachować warunek (11), należy zapewnić aby rezystancja dodatkowa była znacznie większa od rezystancji badanego obiektu. Zakładając bowiem, że rezystancja badanego obiektu jest równa rezystancji dodatkowej (czyli rezystancji przyjętego zestawu rezystorów zamontowanych w generatorze), tłumienie prądu udarowego jest wtedy znacznie większe niż w sytuacji, gdy dominującą wartością rezystancji jest rezystancja R_d . Dzięki temu można przewidzieć zmiany kształtu udaru prądowego, a także uzyskać dopasowanie falowe.

W celu analitycznego opisanie parametrów udaru na podstawie parametrów obwodu generatora (rys. 4), można posłużyć się wzorami [9]:

$$(12) \quad T_d = 1,8 \cdot n \cdot \sqrt{LC},$$

$$(13) \quad T_t = \frac{T_d}{1 - \frac{3,3}{n}},$$

$$(14) \quad I_m = \left(1,3 - 0,4 \cdot \frac{R_1}{Z}\right) \cdot \frac{U}{2Z},$$

gdzie:

n – liczba ogniw LC generatora,

$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – impedancja falowa linii długiej.

Dopuszczalne tolerancje parametrów udarów

W praktycznych realizacjach generatorów prądowych parametry udaru mogą być uzyskiwane z ograniczoną precyzją. Norma IEC 62475 [4] dopuszcza tolerancje poszczególnych parametrów. Dla udarów prądowych *wykładniczych* parametry mogą zostać zachowane w tolerancji: wartość szczytowa $\pm 10\%$, czas trwania czoła $\pm 20\%$, czas do półszczytu $\pm 20\%$. Z kolei dla udarów prądowych *prostokątnych* tolerancje wynoszą: wartość szczytowa od 0% do 20% , czas trwania udaru T_d od 0% do $+20\%$, całkowity czas trwania $< 1,5 T_d$. W przypadku obydwu kształtów udarów, dla ładunku całkowitego i całki Joule'a dolny limit tolerancji to 0% , natomiast górny limit jest ustalany przez komitety techniczne krajowych jednostek normalizacyjnych. Zapis 0% w normie IEC 62475 [4] oznacza, że nie dopuszcza się zmniejszenia wartości szczytowej udaru poniżej wartości nominalnej, natomiast dozwolone jest jej przekroczenie o 20% . Z kolei według normy IEC 61643-11 [5], dla udaru 8/20 tolerancja dla czasu trwania czoła i czasu do półszczytu wynosi 10% , a według normy IEC 60099-4:2004 [22], dla udaru prostokątnego tolerancje dla wartości szczytowej udaru wynoszą -10% i $+10\%$ dla pierwszego udaru oraz 0 i $+10\%$ dla kolejnych udarów.

Poniżej omówione zostaną techniczne rozwiązania generatorów prądowych, mające na celu spełnienie wymagań normy IEC 62475 [4].

Techniczna realizacja układów generatorów prądowych

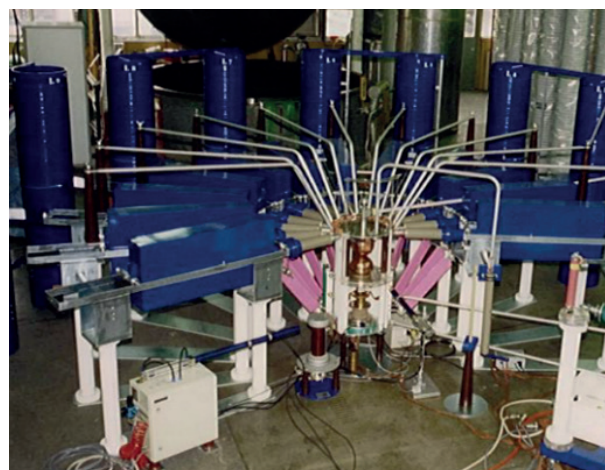
Parametry udaru prądowego zależą od sumarycznych wartości rezystancji, indukcyjności oraz pojemności obwodu generatora. Kluczowym wyzwaniem

przy doborze tych parametrów jest konieczność uzyskania wysokiej wartości prądu szczytowego udaru przy jednoczesnym zachowaniu maksymalnej stromości czasu czoła udaru [11]. Przykładem generatora, w którym uzyskiwane są prądy o wysokiej wartości szczytowej oraz dużej stromości czoła impulsu, jest generator typu Plasma-Focus znajdujący się w laboratorium PF-1000U w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy [14].

Układ ten umożliwia prowadzenie badań plazmy, której czas życia wynosi około $200\text{--}300$ ns i która jest podtrzymywana przez jej własne pole magnetyczne. Aby wygenerować pole indukcji magnetycznej o odpowiednim natężeniu, generator musi dostarczać prąd o wartościach szczytowych rzędu kilku megaamperów (MA). Zgodnie z analizą przedstawioną powyżej, osiągnięcie takich parametrów wymaga minimalizacji sumarycznej rezystancji i indukcyjności obwodu generatora. Poniżej przedstawiono techniczne metody umożliwiające utrzymanie parametrów udaru prądowego w granicach tolerancji zgodnie z wymaganiami normy IEC 62475 [4].

Podstawowym sposobem jest wyposażenie generatora w kondensatory impulsowe o bardzo małych indukcyjnościach i rezystancjach własnych. Indukcyjności własne kondensatorów impulsowych, w zależności od ich wartości pojemności sięgają od 10 nH do 90 nH [15].

Połączenie n kondensatorów w baterię tworzącą zasobnik energii pozwala na zmniejszenie wypadkowej indukcyjności oraz rezystancji n -krotnie. W standardowych układach generatorów udarów prądowych kondensatory rozmieszczane są równomiernie na obwodzie okręgu. Dzięki temu wszystkie połączenia łączące zasobnik energii z iskiernikiem (rys. 5) mają zbliżone (praktycznie identyczne) parametry elektryczne. Takie rozmieszczenie elementów dodatkowo redukuje indukcyjność zewnętrzną L_d [11].

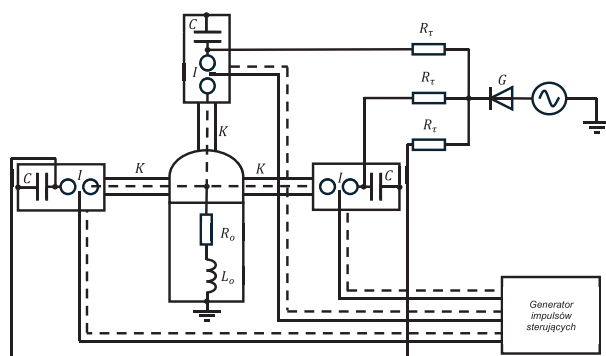


Rys. 5. Generator udarów prądowych w układzie kołowym [16]

W rozwiązaniu tym, pomimo zmniejszenia wypadkowej indukcyjności i rezystancji kondensatorów oraz zmniejszenia indukcyjności L_d , zmniejszenie indukcyjności jest ograniczone poprzez sprzężenie magnetyczne elementów układu [9]. Dodatkowo istnieje tu poważne ryzyko awarii, która może wystąpić w przypadku uszkodzenia jednego z kondensatorów, spowodowanego defektem jego okładek. Poprzez uszkodzone okładki kondensatora element ten nie może naładować się do zadanego napięcia. Wówczas na przerwie iskiernikowej występuje napięcie zbyt małe do zainicjowania wyładowania, a tym samym rozładowania kondensatorów. W takiej sytuacji całość energii zgromadzonej w baterii kondensatorów zostaje rozładowana przez uszkodzony kondensator do ziemi, zamiast przez iskiernik do obiektu badanego. Wówczas duża ilość energii, przekraczającej 15 kJ, może prowadzić do eksplozji uszkodzonego kondensatora z uwagi na wydzielanie się bardzo dużej ilości energii w niewielkiej przestrzeni międzyokładkowej [9].

Sekcjonowanie kondensatorów

Rozwiązaniem tego problemu jest sekcjonowanie kondensatorów (rys. 6). W układzie tym bateria kondensatorów zostaje podzielona na mniejsze grupy, zwane sekcjami. Na wyjściu każdej sekcji znajduje się iskiernik sterowany, którego zadaniem jest zapewnienie jednoczesnego zapłonu wszystkich sekcji kondensatorów. Iskierniki poszczególnych sekcji są połączone z obiektem badanym za pomocą kabli koncentrycznych.



Rys. 6. Generator udarów prądowych z sekcjonowanymi kondensatorami: C – sekcja kondensatorów, I – iskiernik sterowany, K – kabel koncentryczny, R_o – rezystancja obiektu, L_o – indukcyjność obiektu

Rozwiązanie to nie tylko eliminuje ryzyko rozładowania całej baterii wskutek uszkodzenia pojedynczego kondensatora, lecz także znacznie zwiększa redukcję indukcyjności układu. Ma to znaczenie zwłaszcza w przypadku, kiedy indukcyjność obiektu badawczego jest znacząca i wpływa na parametry

udaru prądowego. W przypadku podziału całego zespołu kondensatorów na n_2 sekcji, wypadkowa indukcyjność wynosi:

$$(15) \quad L = L_o + \frac{L_c}{n_1} + \frac{L_p}{n_2},$$

gdzie:

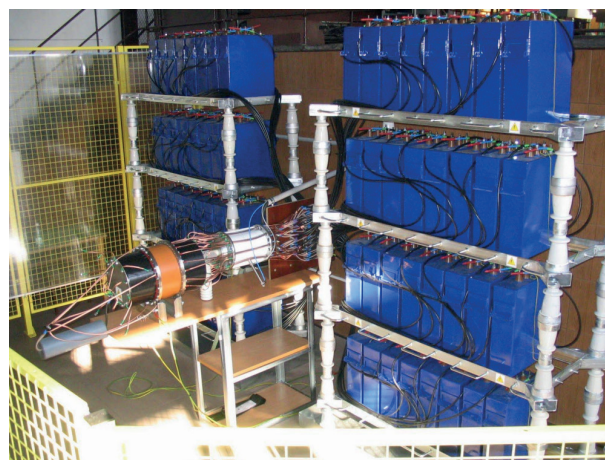
L_p – indukcyjność iskierników i ich połączeń,

L_c – indukcyjność własna jednego kondensatora,

L_o – indukcyjność badanego obiektu,

n_1 – całkowita liczba kondensatorów,

n_2 – liczba iskierników.



Rys. 7. Generator udarów prądowych konstrukcji prof. Lesława Karpińskiego w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej [17]

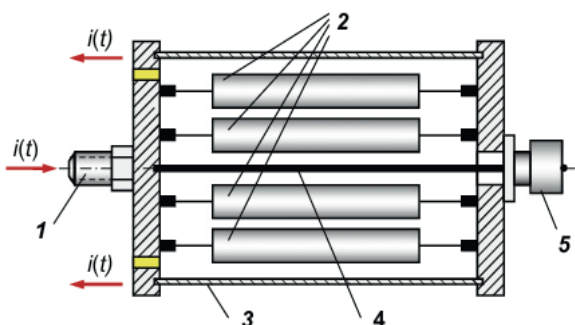
Synchronizacja iskierników

Jednoczesna inicjacja wyładowań w iskiernikach sterujących realizowana jest za pomocą sygnału wychodzącego z dedykowanego układu generatora impulsów sterujących. Aby zapewnić prawidłową synchronizację w procesie jednoczesnego zapalenia wszystkich sekcji baterii kondensatorów, różnica czasów między zapłonami iskierników nie powinna przekraczać czasu dwukrotnego przejścia fali udarowej przez kabel koncentryczny K, łączący sekcję kondensatorów z obiektem badanym. W przeciwnym razie, z uwagi na działanie fal odbitych, może nie dojść do zapłonu iskierników w pozostałych sekcjach.

Indukcyjność i pasmo bocznika pomiarowego

Kolejnym czynnikiem wpływającym na zwiększenie stromości oraz wartości szczytowej udaru prądowego jest zastosowanie elementów pomiarowych o niskiej indukcyjności, takich jak bocznik pomiarowy. Jego podstawowa konstrukcja została przedstawiona na rys. 8. Mierzony prąd udarowy doprowadzany jest do zacisku 1, a następnie równomiernie rozkładany

na szeregu nisko-omowych rezystorów 2. Prąd powrotny przepływa z kolei przez zewnętrzny metalowy cylinder 3. Dzięki tej konfiguracji prąd płynący w metalowym cylindrze wytwarza pole magnetyczne o zwrocie przeciwnym do pola generowanego przez prąd płynący przez rezystory. Wzajemne znoszenie się składowych pola magnetycznego pochodzącego od prądów wpływającego i wypływającego skutkuje redukcją wypadkowej indukcyjności bocznika (rys. 9). Ta kompensacja nie tylko minimalizuje indukcyjność układu, ale również znacząco poprawia charakterystykę częstotliwościową bocznika, umożliwiając precyzyjny pomiar prądów uderowych w szerokim zakresie pasma częstotliwości [18].



Rys. 8. Rezystor pomiarowy z równolegle połączonymi rezystorami w metalowej obudowie; 1 – zacisk prądowy, 2 – rezystory indywidualne, 3 – przewód powrotny prądu, 4 – punkt pomiarowy i przewód do zacisku wyjściowego, 5 – wspólny zacisk wyjściowy [18]

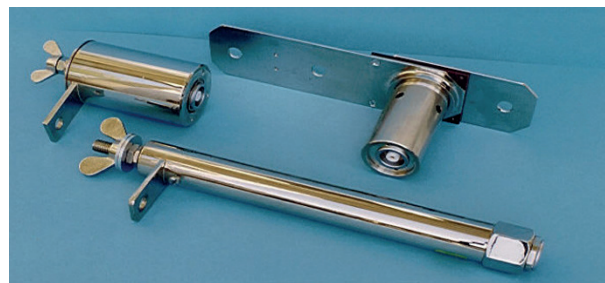
Iskiernik inicjujący rozładowanie kondensatorów

Na zwiększenie wartości szczytowej uderu prądowego wpływa również zastosowanie odpowiedniego typu iskiernika inicjującego rozładowanie kondensatorów. Iskiernik próżniowy, w przeciwieństwie do iskierników powietrznych działających przy ciśnieniu atmosferycznym, umożliwia przepływ prądów o znacznie większych wartościach, sięgających kilku MA, przy jednoczesnym zachowaniu niskiej indukcyjności własnej. Dla porównania, iskierniki powietrzne zazwyczaj umożliwiają przepływ prądów nie przekraczających 100 kA [9].

Prąd rewersyjny

Kolejnym wymaganiem związanym z wysoką indukcyjnością układu, poza wartością szczytową i stromością uderu prądowego, dotyczy prądu rewersyjnego. Według normy IEC 61643-11 [5], zmiana biegunowości prądu po spadku prądu do zera nie może być większa niż 30% wartości szczytowej. Oznacza to, że wartość szczytowa prądu uderowego po zmianie biegunowości nie może być większa niż 30 % wartości szczyto-

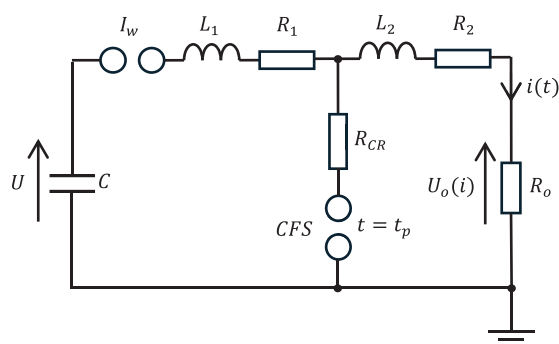
wej przed zmianą biegunowości. Zagadnienie to można analizować w dwóch aspektach. Pierwszym jest znaczna redukcja żywotności kondensatorów z racji ich oscylacyjnego rozładowania w słabo tłumionym obwodzie probierczym. Na krawędziach okładek kondensatorów, podczas fazy rozładowania powstają wyładowania niezupełne. Zależą one od bezwzględnej wartości zmiany napięcia, tj. $(U_{\max} - U_{\min})$ oraz od stromości napięcia.



Rys. 9. Zestaw bocznika do pomiaru uderów prądowych o wartości szczytowej do 30 kA [16]

Drugi aspekt dotyczy samych obiektów badawczych, takich jak np. ograniczniki przepięć. W ich przypadku dopuszczalna wartość prądu rewersyjnego nie może przekraczać określonej w normie IEC 62475 [4] wartości szczytowej prądu probierczego. Jest to spowodowane wrażliwością warystorów z tlenków metali ZnO na częstą zmianę ich rezystancji. W momencie częstego przewodzenia prądów uderowych przez pastylki warystorowe ogranicznika, dochodzi do zjawisk elektrochemicznych degradujących ich parametry, a tym samym redukujących ich czas życia [19].

Typowo jednak, aspekt skracania żywotności obiektu badanego w kontekście badań certyfikujących nie jest istotny, tym bardziej, że obiekt testowy po badaniach musi zostać zutyliзовany. Chodzi więc tu raczej o nadmierną zmianę parametrów ogranicznika przepięć z uwagi na niewłaściwie dobrane parametry uderu, w tym przypadku prądu rewersyjnego. Może to prowadzić do uszkodzenia ogranicznika i negatywnego wyniku badania, wynikającego z obsługi technicznej układu probierczego i warunków wykonywania próby.



Rys. 10. Generator prądów uderowych z przerwą Crowbar (ang. crowbar gap) oraz układem wyzwalającym CFS (Crowbar Firing System), zapobiegającym odwróceniu polaryzacji w ogniu prądów uderowych

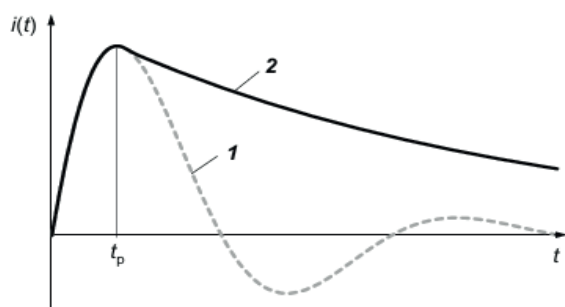
Oscylacje prądu rewersyjnego mogą zostać wytłumione za pomocą dodatkowej rezystancji rozładowczej, jednak rozwiązanie to powoduje jednocześnie wydłużenie czasu T_2 i zmniejszanie czasu T_1 oraz wartości szczytowej udaru. Ponieważ parametry te muszą pozostawać w ściśle określonych tolerancjach [4], modyfikacje układu probierczego nie mogą być realizowane w sposób nieograniczony.

Łącznik zwarciový typu Crowbar

W takiej sytuacji alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie łącznika zwarciovýgo typu Crowbar. Pozwala on na ograniczenie prądu rewersyjnego bez konieczności dokładania rezystancji rozładowczej do układu. Schemat układu z łącznikiem zwarciovým typu Crowbar przedstawiono na rys. 10 [18].

Działanie układu przedstawionego na rys. 10 polega na inicjacji wyładowania w iskierniku poprzez układ wyzwalający CFS (ang. *Crowbar Firing System*), co wykonywane jest w chwili osiągnięcia wartości szczytowej prądu udarowego. Przed zadziałaniem iskiernika CFS cała energia zgromadzona w naładowanym do napięcia U kondensatorze C zostaje oddana do indukcyjności L_2 (gdyż $L_2 \gg L_1$). Za pomocą obwodu Crowbar energia z indukcyjności L_2 zostaje rozładowana przez obiekt badany P ze stałą czasową równą $L_2 / (R_{CR} + R_2)$.

Dzięki odcięciu pojemności C w chwili rozładowania jej na indukcyjności L_2 , prąd udarowy nie przyjmuje oscylacyjnego charakteru. Cały proces prowadzi do powstania aperiodycznego przebiegu prądu udarowego, eliminując całkowicie prąd rewersyjny (rys. 11).



Rys. 11. Przebieg prądu udarowego: 1 – przebieg bez układu Crowbar, 2 – przebieg z układem Crowbar [18]

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem i konstrukcją generatorów prądowych wraz z normalizacją dotyczącą badań z użyciem udarów prądowych. Omówiono zasadę działania generatorów w przypadku wytwarzania udarów o kształcie wykładniczym oraz prostokątnym. Opisano praktyczne konstrukcje generatorów oraz omówiono ich elementy wpływające na parametry udarów prądowych, w szczególności na wartość szczytową udaru, różne rodzaje czasów trwania impulsu prądowego (w tym stromość) oraz prąd rewersyjny. Omówione zależności umożliwiają dobór parametrów układu probierczego dla zapewnienia pożądanego kształtu i parametrów udaru prądowego.

Prezentowano praktyczne rozwiązania techniczne umożliwiające spełnienie wymagań w zakresie prowadzenia badań urządzeń, aparatury elektroenergetycznej i osprzętu aparaturowego z użyciem udarów prądowych, określonych w przywołanych aktach normalizacyjnych. Omówiono zagadnienie utrzymania wartości parametrów udarów w zakresie dopuszczonych w dokumentach normalizacyjnych tolerancji. Opisano sposoby połączenia baterii kondensatorów (ułożenie kondensatorów na obwodzie okręgu lub połączenie w sekcje), zagadnienie zastosowania elementów nisko-indukcyjnych (kondensatory impulsowe oraz boczniki pomiarowe), a także zagadnienie redukcji prądu rewersyjnego przy użyciu łącznika zwarciovýgo typu Crowbar.

Podziękowania

Autorzy dziękują za wsparcie finansowe udzielone w ramach projektu nr 2019/34/E/ST7/00187 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN).

Autorzy wyrażają wdzięczność dr. inż. K. Kutorasińskiemu za życzliwe dzielenie się wiedzą i doświadczeniem w zakresie wysokonapięciowej techniki pomiarowej oraz pomiarów w układzie generatora prądowego wysokich częstotliwości.

Przyjęto: 18.08.2025, zaakceptowano: 03.10.2025, opublikowano: 27.10.2025

LITERATURA

- [1] Strona internetowa, <https://ien.com.pl/>, dostęp 2025-06-24
- [2] Strona internetowa, <https://www.dehn-international.com/en/centre-test-dehn>, dostęp 2025-06-24
- [3] Strona internetowa, <https://www.ee.pw.edu.pl>, dostęp 2025-06-24
- [4] IEC 62475, „Wielkopiędowa technika probiercza – Definicje i wymagania dotyczące prądów probierczych i układów pomiarowych”, 2010
- [5] IEC 61643-11, „Niskonapięciowe urządzenia ograniczające przepięcia – Część 11: Urządzenia ograniczające przepięcia w sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia – Wymagania i metody badań”, 2011
- [6] IEC 62305-1, „Ochrona odgromowa – Część 1: Zasady ogólne”, 2024
- [7] IEC 61000-4-5, „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-5: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na udary”, 2014
- [8] Strona internetowa, <https://www.ifpilm.pl>, dostęp 2025-06-24
- [9] Wodziński J.: Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997
- [10] Schon K.: “High voltage measurement techniques,” Springer International Publishing, 2019
- [11] Korycki P., Wodziński J.: „Wytwarzanie i pomiary prądów udarowych” Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985
- [12] Martinez M., Zanetta L., The Energy Absorption Capacity of Metal Oxide Surge Arresters – An Approach for Switching Surges, IPST 1999
- [13] IEEE C62.11-2020, IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC power Circuits (>1 kV), 2020
- [14] Strona internetowa, <https://www.ifpilm.pl/ztp-laboratoria/laboratorium-pf-1000u>, dostęp 2025-06-24
- [15] General ATOMICS Electromagnetic Systems, “Product Specification of High Voltage Capacitors,” 2025
- [16] HAEFELY Impulse Current Test System, Type SSGA 30-200 kA
- [17] Wykład „Technika probierczo-pomiarowa”, Politechnika Warszawska, Zakład Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej, 2022
- [18] Schon K: High impulse voltage and current measurement techniques, Switzerland: Springer, 2013.
- [19] Haryono T., Sirait K.T., Berahim H.: “The Design of a High Amplitude Impulse Current Generator,” IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2008.
- [20] Gonos, I. F., Leontides, N., Topalis, F. V., Stathopoulos, I.A.: “Analysis and design of an impulse current generator,” WSEAS Transactions on Circuits, 2002
- [21] Strona internetowa, <https://iel.lukasiewicz.gov.pl>, dostęp 2025-08-18
- [22] IEC 60099-4, „Ograniczniki przepięć – Część 4: Beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego”, 2014