

## Zastosowanie bardzo szybkiej kamery UV dla obserwacji rozwoju wyładowań elektrycznych w układzie elektrod ostrze-płaszczyzna

**Streszczenie.** Wyładowanie elektryczne w powietrzu jest dynamicznym zjawiskiem fizycznym o bardzo dużej szybkości rozwoju. W artykule przedstawiono zastosowanie bardzo szybkiej kamery UV, pozwalającej na rejestrację obrazów z szybkością do 200 milionów klatek na sekundę, dla obserwacji rozwoju wyładowań elektrycznych w układzie elektrod ostrze-płaszczyzna. Rejestracje wyładowań wykonano zasilając układ elektrod udarami napięciowymi piorunowymi o biegunowości dodatniej lub ujemnej, o różnej stromości i różnym czasie do ucięcia. W artykule analizowane są zagadnienia dotyczące synchronizowania układu wyzwalania kamery oraz problemy towarzyszące rejestracji obrazów wyładowań.

**Abstract.** Electrical discharge in the air is a dynamic physical phenomenon with a very high speed of development. The paper presents the use of an ultra-high speed UV camera that allows images to be recorded at up to 200 million frames per second for observing the development of electrical discharges in a point-to-plane electrode system. The discharges were recorded when the electrode system was supplied with lightning impulses of positive or negative polarity, with varying steepness and time to chopping. The paper analyzes issues related to the synchronization of the camera's triggering system and the problems accompanying the recording of discharge images. (Use of ultra-high speed UV camera for observation of electrical discharge development in point-to-plane electrode configuration)

**Słowa kluczowe:** wyładowania elektryczne, izolacja powietrzna, obserwacja wyładowania, bardzo szybka kamera UV  
**Keywords:** electrical discharges, air insulation, discharge observation, very fast UV camera

### Wprowadzenie

Badania mechanizmów powstawania i rozwoju wyładowań elektrycznych w gazach, w szczególności w powietrzu, mają swoją długą historię, sięgającą połowy XIX wieku. Pierwsze rejestracje fotograficzne wyładowań atmosferycznych miały miejsce na początku lat 80. tego stulecia [1]. Wraz z rozwojem technik badawczych rejestracje wizyjne wyładowań były wykonywane przy zastosowaniu różnych rodzajów urządzeń. Stosowano w tym celu np. przyrządy pomiarowe wykorzystujące fotopowielacze oraz metody fotografii bezpośredniej. W ostatnich dziesięcioleciach stosowane są zwykle kamery z detektorami CCD, umożliwiającymi obserwacje wyładowań z coraz większą rozdzielczością obrazową i czasową. Zmieniające się, wciąż doskonalone możliwości techniczne sprawiają, że tematyka ta jest wciąż aktualna pod względem poznawczym.

Prace prowadzone w ostatnich latach w różnych ośrodkach naukowych obejmują: obserwacje wizyjne rozwoju wyładowań elektrycznych powstających w gazach, cieczach oraz na powierzchniach granicznych (wyładowania powierzchniowe). Poza obserwacją optyczną, w zakresie światła widzialnego, badania takie obejmują również obserwacje wyładowań w zakresie promieniowania ultrafioletowego (UV), wytwarzanego przez wyładowania elektryczne powstające zarówno w gazach jak i w cieczach. Przykładowo, dla wyładowań łukowych w wodzie rejestrowane widmo promieniowania zawiera zakresy UV-A, UV-B i UV-C promieniowania ultrafioletowego [2, 3].

Prace badawczo-rozwojowe oraz wdrożenia rozwiązań technologicznych dotyczące obserwacji w paśmie UV wyładowań elektrycznych w powietrzu dla potrzeb elektroenergetyki obejmują wykrywanie ulotu elektrycznego na przewodach i osprzęcie linii napowietrznych wysokiego napięcia i urządzeń stacyjnych, w tym również w systemach HVDC [4-6]. Głównym ich celem jest diagnostyczna identyfikacja defektów charakteryzujących się lokalnym podwyższeniem wartości natężenia pola elektrycznego do wartości przekraczającej wartość krytyczną [7].

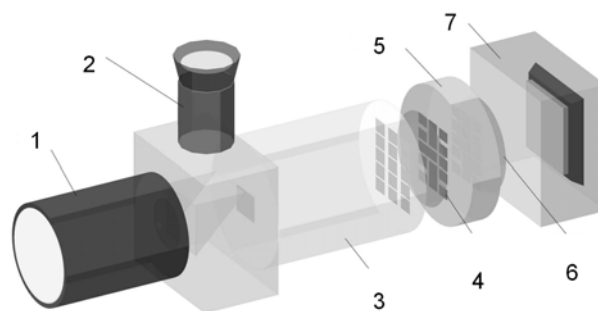
Liczne ośrodki naukowe prowadzą również badania w zakresie wpływu dielektryków ciekłych na mechanizmy

rozwoju wyładowań w układach izolacyjnych je zawierających. Część tego typu prac opiera się w głównej mierze na rejestracji i analizie impulsów świetlnych wytwarzanych podczas tego procesu [8].

Zazwyczaj laboratoryjne obserwacje wyładowań elektrycznych prowadzone są przy szybkościach rejestracji nieprzekraczających 10.000 klatek/s. Ma to także związek z występującymi ograniczeniami stosowanej maksymalnej rozdzielczości obrazu, oferowanej przez dostępne systemy pomiarowe. W artykule przedstawiono wyniki rejestracji wyładowań elektrycznych w powietrzu w układzie elektrod ostrze-płaszczyzna przy użyciu bardzo szybkiej kamery UV, umożliwiającej uzyskanie szybkości rejestracji obrazów do 200 milionów klatek/s. Wyładowania wytwarzano zasilając układ elektrod udarami napięciowymi piorunowymi o biegunowości dodatniej lub ujemnej, o różnej stromości i różnym czasie do ucięcia.

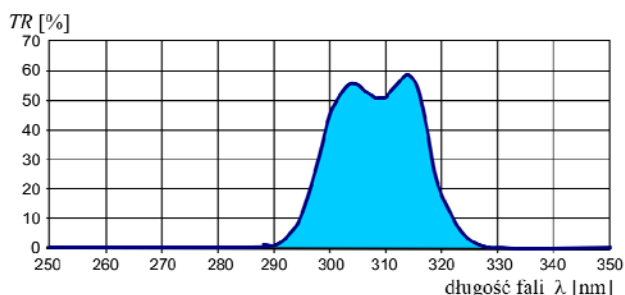
### Ultra szybkie kamery UV – konstrukcja i parametry

Schemat blokowy ultraszybkiej kamery UV (Invisible Vision typ UHSi) przedstawiono na rysunku 1. Zastosowane rozwiązania konstrukcyjne umożliwiają rejestrację obrazów z szybkością do 200 klatek w czasie 1  $\mu$ s, przy minimalnym czasie ekspozycji równym 5 ns.



Rys.1. Schemat blokowy konstrukcji ultraszybkiej kamery UV, 1) obiektyw z soczewkami, 2) wizjer pomocniczy, 3) kalejdoskopowy podzielnik obrazu, 4) fotokatody oraz układy bramkujące, 5) matrycowy wzmacniacz obrazu, 6) ekran fosforowy, 7) 16 megapikselowa matryca CCD [9]

Dzięki zastosowaniu filtrów optycznych eliminujących promieniowanie widzialne oraz obiektywu wykonanego ze szkła krzemowego kamera może rejestrować obrazy w paśmie UV (rys.2) [9, 10]. Zastosowanie matrycowego wzmacniacza obrazu pozwala na rejestrację zdarzeń o bardzo niskich energiach promieniowania E-M w obserwowanym zakresie częstotliwości. Technicznym ograniczeniem kamery jest możliwość rejestracji jedynie 12 lub 24 kolejno po sobie następujących klatek. Rozdzielczość rejestracji wynosi 1000x860 pikseli.



Rys.2 Charakterystyka przepuszczania filtra UV zastosowanego w kamerze użytej w badaniach;  $TR$  – współczynnik przepuszczania

W kamerze zastosowano migawkę elektroniczną aktywującą sekwencyjną rejestrację obrazu przez kolejne 12/24 segmenty matrycy CCD. Aktywacja ta jest związana ze zmianą wzmocnienia sygnału w poszczególnych torach transmisji sygnałów. Pomimo bardzo dużego tłumienia sygnału w torach segmentów nieaktywnych (w danej chwili czasu) przy ekstremalnie dużych wartościach natężenia promieniowania, występujących m.in. podczas przepływu prądu wyładowania zupełnego, może jednak dojść do przenikania sygnału do teoretycznie nieaktywnej matrycy. Skutkuje to rejestracją obrazu śladowego (fantomu), a efekt wstecznego zapisu sygnałów o dużej wartości do już wcześniej zapisanych segmentów musi być uwzględniony przy interpretowaniu wyników rejestracji.

#### Stanowisko laboratoryjne do obserwacji wyładowań elektrycznych w układzie elektrod ostrze-płaszczyna

Stanowisko eksperymentalne do rejestracji wizyjnej wyładowań elektrycznych w paśmie promieniowania UV, zestawiono w komorze pomiarowej (będącej wielkogabarytową klatką Faradaya), w Laboratorium Nowych Technologii w Elektroenergetyce (LNTE) na Wydziale EAIIB Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Urządzeniem rejestrującym wyładowania była kamera typu UHSi [9], wyposażona w filtr UV 308 nm (rys.2) [10]. Źródłem wysokiego napięcia był generator napięć udarowych Haefely SGSA 400-20 (rys.3) skonfigurowany do wytwarzania znormalizowanych napięć udarowych piorunowych o zadanej polaryzacji. Elektroda ostrzowa została podłączona do wyjścia napięciowego generatora, a płaska elektroda talerzowa została uziemiona. Odległość pomiędzy elektrodami ustalono na 100 mm.

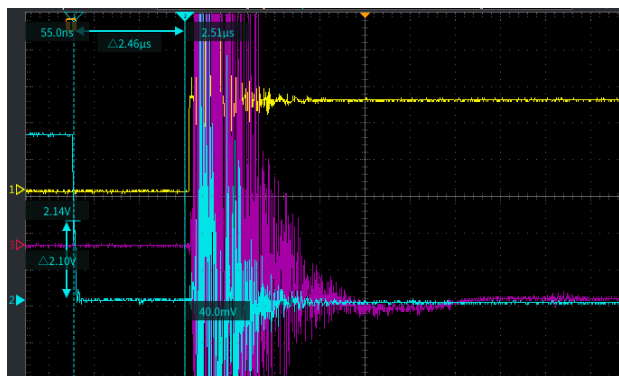
Wyzwalanie generatora oraz rozpoczęcie rejestracji kamery było przeprowadzone z wykorzystaniem sygnału TTL [9] o zboczu opadającym, doprowadzonym do wejść układów zewnętrznego wyzwalania generatora i kamery. Równoczesna rejestracja (rys.5) sygnału wymuszającego, przebiegu udarowego oraz sygnału zwrotnego z kamery, informującego o momencie otwarcia migawki, pozwalała na dokładne wyznaczenie zwłoki czasowej koniecznej dla uzyskania poprawnej synchronizacji i zarejestrowania obrazów rozwijającego się wyładowania, w czasie przed wytworzeniem kanału głównego. Długość zwłoki czasowej dla zestawionego układu pomiarowego wyniosła 2,46  $\mu$ s (rys.5).



Rys.3. Zastosowany w badaniach generator napięć udarowych Haefely SGSA 400-20



Rys.4. Konfiguracja układu pomiarowego: układ elektrod ostrze-płaszczyna oraz szybka kamera UV w klatce Faradaya



Rys.5. Oscylogram sygnału inicjującego pracę generatora oraz kamery (niebieski), sygnału zwrotnego z kamery o momencie otwarcia migawki (żółty) oraz sygnału udaru napięciowego piorunowego (purpurowy)

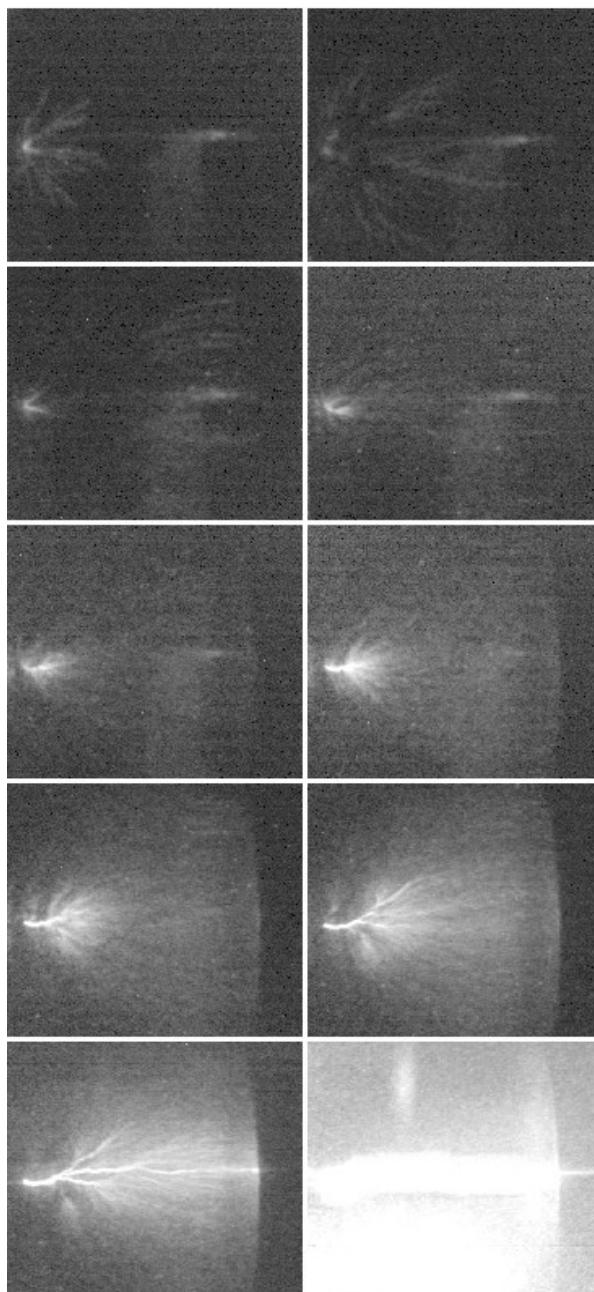
## Rezultaty rejestracji rozwoju wyładowania w powietrzu

Na rysunkach od 6 do 8 przedstawiono wyniki rejestracji zjawisk zachodzących przed wyładowaniem zupełnym, wykonane dla różnych polaryzacji napięcia wymuszającego oraz dla różnych szybkości rejestracji klatek obrazu. Rysunek 6 przedstawia rozwój wyładowania dla badanego układu i napięcia o przewidywanej wartości maksymalnej  $U_m = 300$  kV i polaryzacji dodatniej. Rejestracje wykonano z szybkością 20 klatek/ $\mu$ s oraz dla czasu ekspozycji  $t_e = 50$  ns, tzn. bez nakładania się sąsiednich klatek na siebie. Analizując rezultaty rejestracji można zaobserwować rozwój wyładowania począwszy od klatki 3 do klatki 11, po której następuje wytworzenie kanału głównego i ucięcie udaru wytwarzanego przez generator. Zjawiska zachodzące przed rozwojem kanału głównego oraz w momencie wystąpienia wyładowania zupełnego posiadają różne intensywności energetyczne, przez co nie jest możliwe obserwowanie pełnego procesu wyładowania ze względu na niedostateczną dynamikę wzmacniacza obrazu i matrycy rejestrującej. Z uzyskanych wyników można wyodrębnić 2 fazy rozwoju wyładowania: 1) pierwszą, widoczną na trzech pierwszych klatkach, na których następuje proces rozwoju lawin pierwotnych, 2) drugą, widoczną na klatkach pozostałych, na których widać rozwój wyładowania, doprowadzającego do wystąpienia zwarcia międzyelektrodowego. Druga faza rozwoju wyładowania charakteryzuje się nieliniową zmianą szybkości, wraz ze zbliżaniem rozwijającego się wyładowania do płaszczyzny uziemionej. Rozwój wyładowania zaczyna się przy elektrodzie wysokiego napięcia, przy której natężenie pola elektrycznego ma największą wartość.

Wynik rejestracji rozwoju wyładowania przy napięciu udarowym piorunowym o przewidywanej wartości maksymalnej  $U_m = 400$  kV i polaryzacji dodatniej przedstawiono na rysunku 7. Ustawione parametry kamery były identyczne z ustawieniami dla wcześniejszego przypadku. Pierwsza faza rozwoju wyładowania widoczna na rysunku 7 obejmuje klatki 6 oraz 7, na klatkach 8-12 obserwuje się fazę rozwoju wyładowania głównego. W związku z oddziaływaniem udaru o większej stromości obserwuje się zwiększoną szybkość rozwoju lawin pierwotnych oraz skrócenie całkowitego czasu rozwoju wyładowania prowadzącego do zwarcia międzyelektrodowego. Cały zarejestrowany proces przebiega analogicznie do procesu z rysunku 6.

Rysunek 8 przedstawia rozwój wyładowania dla napięcia udarowego piorunowego o polaryzacji ujemnej oraz przewidywanej wartości maksymalnej  $U_m = 400$  kV. Rejestrację przeprowadzono z szybkością 12,5 klatki/ $\mu$ s oraz przy czasie ekspozycji  $t_e = 80$  ns (bez nakładania się obrazu sąsiednich klatek). Porównując ten proces do procesu z rozwoju wyładowania dla napięcia udarowego piorunowego o polaryzacji dodatniej widać znaczące różnice w sekwencji rozwoju wyładowania ze względu na odmienne mechanizmy fizyczne występujące podczas tego procesu [1-3]. Pierwsza faza rozwoju wyładowania oraz wyrzutu lawin pierwotnych występuje na klatce 2 i 3, a faza zachodzi w sposób mniej intensywny niż dla polaryzacji dodatniej.

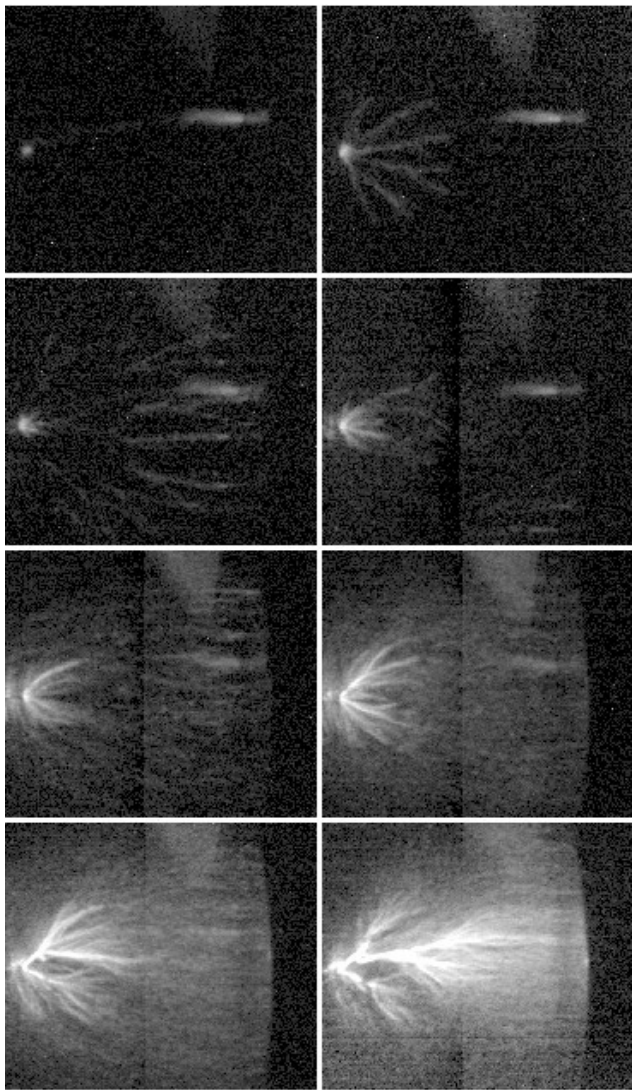
Na rysunku 8 na wszystkich zarejestrowanych klatkach widać ślad wyładowania głównego, które zachodzi dopiero w klatce ostatniej i którego intensywność powoduje wsteczne „naświetlenie” wcześniejszych klatek. Jest to spowodowane efektem niezerowego wzmocnienia torów pomiarowych podczas odcięcia migawki elektronicznej. Narost prądu w kanale głównym zachodzi niemal natychmiastowo (klatka 10). Obserwuje się jednak wzrost całkowitego czasu rozwoju wyładowania, który przekłada się na wzrost napięcia przeskoku dla napięcia o polaryzacji ujemnej, dla badanego układu o polu silnie nierównomiernym.



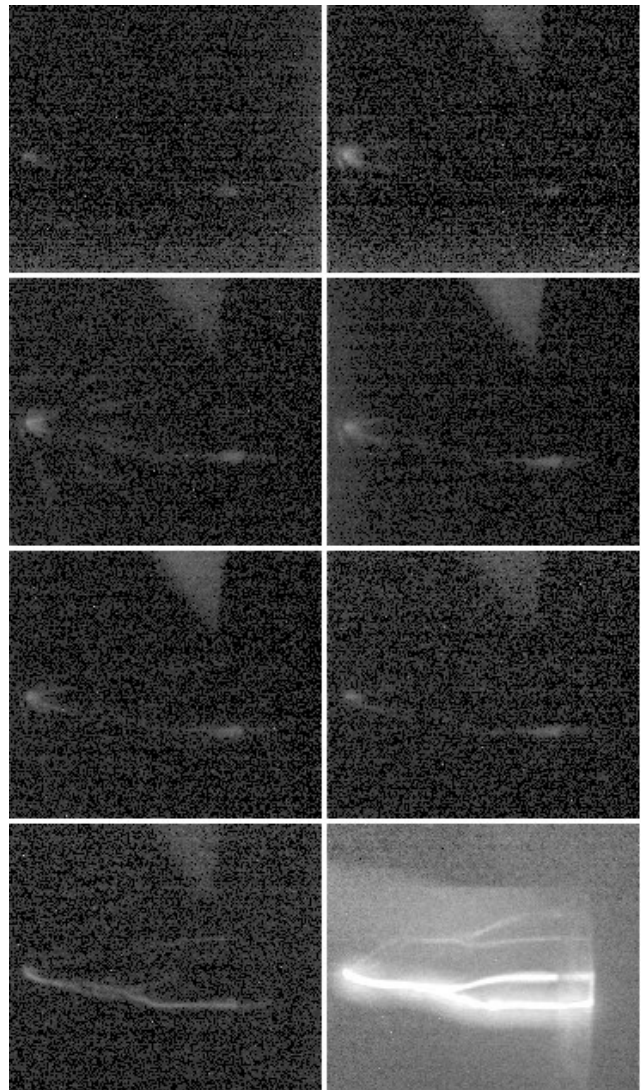
Rys.6 Wyniki rejestracji wizyjnej rozwoju wyładowania; parametry rejestracji: 20 klatek/ $\mu$ s, czas ekspozycji 50 ns; udar napięciowy piorunowym o wartości maksymalnej 300 kV, polaryzacja dodatnia

## Podsumowanie i wnioski

Rezultaty badań potwierdzają możliwość poklatkowej obserwacji rozwoju wyładowań elektrycznych w powietrzu przy zastosowaniu kamery UV. Dla rejestracji tych zdarzeń niezbędne jest zastosowanie urządzenia o czasach ekspozycji nie dłuższych niż kilkudziesiąt ns, wyposażonego we wzmacniacz obrazu oraz możliwość rejestracji kolejnych klatek oddalonych od siebie o dziesiątki ns. W związku z silną różnicą intensywności zdarzeń występujących w fazie przedwyładowaniowej i fazie rozwoju kanału głównego nie jest możliwe jednoczesne obserwowanie tych procesów. Otrzymane obrazy potwierdzają odmienne mechanizmy fizyczne występujące w procesie wyładowania w gazach w polu silnie nierównomiernym dla dodatniej oraz ujemnej polaryzacji napięcia udarowego.



Rys.7. Wyniki rejestracji rozwoju wyładowania kamerą UV; szybkość rejestracji 20 klatek/ $\mu$ s, czas ekspozycji 50 ns, wymuszenie udarem napięciowym piorunowym o wartości maksymalnej 400 kV, polaryzacja dodatnia



Rys.8. Wyniki rejestracji rozwoju wyładowania kamerą UV; szybkość rejestracji 12,5 klatek/ $\mu$ s, czas ekspozycji 80 ns, wymuszenie udarem napięciowym piorunowym o wartości maksymalnej 400 kV, polaryzacja ujemna

**Autorzy:** dr inż. Maciej Kuniewski, [maciek@agh.edu.pl](mailto:maciek@agh.edu.pl); dr hab. inż. Paweł Zydrón; prof. nadzw. AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland; [pzydron@agh.edu.pl](mailto:pzydron@agh.edu.pl); Wojciech Konieczny, ENVIBRA sp. z o.o., ul. Koperkowa 35a/2, 62-064 Plewiska, [w.konieczny@envibra.pl](mailto:w.konieczny@envibra.pl); Mark Riches, Invisible Vision Ltd., 17 Princes Street, Norwich, Norfolk, NR3 1AF, UK, [markriches@invisiblevision.com](mailto:markriches@invisiblevision.com)

#### LITERATURA

- [1] <https://hyperallergic.com/301157/the-first-photographs-of-lightning-crackle-with-electric-chaos/>, dostęp: 07.07.2018
- [2] Chang J.S., Looy P.C., Urashima K., Bryden A.D., Pulsed arc discharge in water: mechanism of current conduction and pressure wave formations, *2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Victoria, BC, Kanada, 2000
- [3] Anpilov A.M. i in., Electric discharge in water as a source of UV radiation, ozone and hydrogen peroxide, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 34, 993–999, 2001
- [4] Yun-peng L., Hui-bin W., Wei-jiang C., Ying-jian Y., Jian T., Test study on corona onset voltage of UHV transmission lines based on UV detection, *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, 387-390, 2008
- [5] Shuwei W. i in., The effect of applied-voltage on photon-number of corona discharge on transmission lines defect, *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Shenzhen, China, 1-4, 2013
- [6] Yi Y., Zhang C., Chen Z., Wang L., Effect of surface aging on UV intensity characteristics for long-term energized conductors of HVDC transmission lines, *2016 IEEE Int. Conf. on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Chengdu, China, 1-4, 2016
- [7] Florkowska B., Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, *AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne*, Kraków, 2003
- [8] Rózga P., Wyładowania elektryczne w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta w wybranych cieczach dielektrycznych przy wysokim napięciu udarowym piorunowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 92 nr 10/2016
- [9] Ultra High Speed Framing Camera, The Invisible® Vision, Norwich 2017
- [10] Standard Product Overview UVi, UHSi, The Invisible® Vision, Norwich, 2017