



Politechnika Opolska
Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Mgr Łukasz Nagi

**Analiza promieniowania jonizującego generowanego
przez wyładowania elektryczne**

Rozprawa doktorska przedłożona
Radzie Wydziału Elektrotechniki,
Automatyki i Informatyki
Politechniki Opolskiej

Promotor: Prof. dr hab. inż. Dariusz Zmarzły

Opole, 2016

Pragnę podziękować wszystkim, bez których niniejsza praca nie mogłaby powstać.

Przede wszystkim mojemu Promotorowi Panu Prof. dr hab. inż. Dariuszowi Zmarzłemu za wszelką pomoc udzieloną w czasie dotychczasowej współpracy.

Pragnę podziękować też wszystkim pracownikom Instytutu Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej Politechniki Opolskiej za okazaną pomoc i życzliwość, którą otrzymałem.

Prace dedykuję mojej żonie Marcie oraz najbliższej rodzinie.

Autor

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	5
2. CEL, ZAKRES, TEZA PRACY.....	6
3. MECHANIZM POWSTAWANIA I PROPAGACJI WYŁADOWAŃ ELEKTRYCZNYCH	7
3.1. FIZYKA ZJAWISKA WYŁADOWAŃ ZUPEŁNYCH	7
3.2. ZJAWISKO I KLASYFIKACJA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH.....	8
3.3. METODY DETEKCJI WYŁADOWAŃ ELEKTRYCZNYCH	9
4. RODZAJE PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO I ICH DETEKCJA.....	16
4.1 ŹRÓDŁA I RODZAJE PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO	16
4.2 ZJAWISKO JONIZACJI	18
4.3.EFEKT FOTOELEKTRYCZNY.....	19
4.4.PROMIENIOWANIE HAMOWANIA	21
4.4.METODY DETEKCJI PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO.....	22
4.4.1 Liczniki jonizacyjne.....	22
4.4.2 Detektory półprzewodnikowe.....	24
4.5.ZJAWISKO SCYNTYLACJI I MATERIAŁY SCYNTYLACYJNE.....	24
4.5.1.Mechanizm scyntylacji.....	24
4.5.2.Podział scyntylatorów i właściwości fizykochemiczne	25
5.OPIS SYSTEMU DO BADANIA PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ELEKTRYCZNE	29
5.1.OGÓLNY OPIS DZIAŁANIA SYSTEMU BADAWCZEGO	29
5.2.UKŁAD DO GENERACJI WYŁADOWAŃ ELEKTRYCZNYCH	31
5.2.1.Iskierniki generujące wyładowania zupełne i niezupełne.....	31
5.2.2.Transformator generujący wysokie napięcie.....	32
5.2.3.Dzielnik napięcia przy transformatorze	33
5.2.4. Pulpit sterowniczy układu wysokonapięciowego	34
5.3 BEZPRZEWODOWY UKŁAD DO STEROWANIA PULPITEM POMIAROWYM.....	34
5.4 UKŁAD DO POMIARU PROMIENIOWANIA WYSOKO-ENERGETYCZNEGO	36
5.4.1 Budowa ogólna układu pomiarowego.....	36
5.4.2.Materiał scyntylacyjny NaI.....	38
5.4.3.Fotopowielacz z zastosowanym kryształem NaI	39
5.4.4. Zasilacz układu wysokonapięciowego detektora scyntylacyjnego	39
5.5. ŚWIATŁOWODOWY UKŁAD POMIAROWY DO AKWIZYCJI SZPILEK SCYNTYLACYJNYCH	40
5.5.1. Schemat układu pomiarowego	40
5.5.2. Przetwornik analogowo-cyfrowy i regulator napięcia odniesienia	42

5.6.	OPROGRAMOWANIE UKŁADU DETEKCYJNO-POMIAROWEGO	43
6.	BADANIA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE	53
6.1.	OPIS UKŁADU POMIAROWEGO DO BADAŃ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH	53
6.2.	SPOSÓB PRZEPROWADZENIA BADAŃ NAD WNZ	53
6.3.	WYBRANE WYNIKI POMIARÓW PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO GENEROWANEGO PRZEZ WNZ	56
6.3.1.	<i>Pomiary promieniowania jonizującego generowanego przez WNZ w powietrzu</i>	<i>56</i>
6.3.2.	<i>Pomiary promieniowania jonizującego generowanego przez WNZ w oleju</i>	<i>62</i>
6.4.	ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO GENEROWANEGO PRZEZ WNZ.....	63
7.	BADANIA PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W POWIETRZU.....	64
7.1.	OPIS UKŁADU POMIAROWEGO DO BADAŃ WYŁADOWAŃ ZUPEŁNYCH W POWIETRZU.....	64
7.2.	SPOSÓB PRZEPROWADZENIA POMIARÓW PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W POWIETRZU	64
7.3.	BADANIE PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO W UKŁADZIE OSTRZE-OSTRZE GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W POWIETRZU.....	65
7.3.1.	<i>Badanie powtarzalności wyników pomiarów promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu</i>	<i>65</i>
7.3.2.	<i>Badanie wpływu odległości scyntylatora od elektrody ujemnej na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego</i>	<i>66</i>
7.3.3.	<i>Badanie wpływu odległości między elektrodami na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego</i>	<i>68</i>
7.3.4.	<i>Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu w układzie ostrze-ostrze</i>	<i>72</i>
7.4.	BADANIE PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO W UKŁADZIE OSTRZE-PŁYTA GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W POWIETRZU.....	73
7.4.1.	<i>Badanie wpływu odległości między elektrodami na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego</i>	<i>73</i>
7.4.2.	<i>Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu w układzie ostrze-płyta.....</i>	<i>77</i>
7.5.	BADANIE PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO W UKŁADZIE SFERA-SFERA O ŚREDNICY KUL 20MM, GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W POWIETRZU.....	77
7.5.1.	BADANIE WPLYWU ODLEGŁOŚCI MIĘDZY ELEKTRODAMI NA WYNIKI POMIARÓW PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W POWIETRZU.....	77
7.5.2.	<i>Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20mm</i>	<i>84</i>

7.6.	BADANIE PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO W UKŁADZIE SFERA-SFERA O ŚREDNICY KUL 50MM, GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W POWIETRZU.....	85
7.6.1.	<i>Badanie powtarzalności wyników pomiarów promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu</i>	85
7.6.2.	<i>Badanie wpływu odległości między elektrodami na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego</i>	86
7.6.3.	<i>Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu w układzie sfera-sfera o średnicy kul 50mm</i>	91
7.7.	PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W POWIETRZU	91
8.	BADANIA PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W OLEJU	92
8.1.	OPIS UKŁADU POMIAROWEGO	92
8.2.	SPOSÓB PRZEPROWADZANIE BADAŃ.....	92
8.3.	BADANIE PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO W UKŁADZIE OSTRZE-OSTRZE GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W OLEJU	93
8.3.1.	<i>Badanie wpływu odległości scyntylatora od elektrody ujemnej na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania zupełne w oleju.....</i>	93
8.3.2.	<i>Badanie wpływu odległości między elektrodami na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego</i>	94
8.3.3.	<i>Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w oleju w układzie ostrze-ostrze</i>	99
8.4.	BADANIE PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO W UKŁADZIE OSTRZE-OSTRZE GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W OLEJU Z PĘCHERZYKAMI POWIETRZA I ARGONU.....	100
8.4.1.	<i>Badanie wpływu wprowadzenia pęcherzyków powietrza pomiędzy elektrody zanurzone w oleju mineralnym.....</i>	100
8.4.2.	<i>Badanie wpływu wprowadzenia pęcherzyków argonu pomiędzy elektrody zanurzone w oleju</i>	102
8.4.3.	<i>Podsumowanie wyników badań promieniowania wysokoenergetycznego w układzie ostrze-ostrze generowanego przez wyładowania zupełne w oleju z pęcherzykami powietrza i argonu.....</i>	107
8.5.	PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO GENEROWANEGO PRZEZ WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W OLEJU	107
9.	PODSUMOWANIE BADAŃ, WNIOSKI I PROBLEMY OTWARTE	108
10.	LITERATURA	110

1. Wprowadzenie

Tematyka dysertacji umiejscowiona jest w dyscyplinie Elektrotechnika w specjalności Technika Wysokich Napięć, a w szczególności dotyczy powstawania zjawiska wysokoenergetycznego promieniowania jonizującego. Prowadzone w tym zakresie prace badawczo-rozwojowe mają na celu zrozumienie mechanizmów powstawania przebiega powietrza zarówno w warunkach laboratoryjnych, przemysłowych jak i środowisku naturalnym [34, 51–53]. Badania zjawiska powstawania promieniowania rentgenowskiego w trakcie przebiega elektrycznego podejmowane są w kilku ośrodkach badawczych. Zajmują się one głównie eksperymentami laboratoryjnymi generowania promieniowania przez wyładowania zupełne i niezupełne, a także wyładowania atmosferyczne. Mechanizm ten jednak ciągle nie jest dobrze rozpoznany. Brak jest natomiast badań skupiających się na samym zagadnieniu promieniowania jonizującego w kontekście jego detekcji oraz pomiarów energii wydzielającej się z tego zjawiska. Wiele badań wykorzystuje promieniowanie X do wzbudzenia czy też przyspieszenia reakcji przebiega badanego układu [2, 4, 5, 106, 108], nie mierzy się jednak wtedy energii promieniowania, które powstaje w trakcie tworzenia się ścieżki ulotu. Samo promieniowanie jonizujące powstające w trakcie generowania się WNZ czy też przebiegów lokalnych i całkowitych w układzie może być istotnym składnikiem bilansu energetycznego wyładowań. Niniejsza dysertacja jest próbą opracowania i opisanie metody detekcji promieniowania wysokoenergetycznego uwalnianego w trakcie wyładowań elektrycznych w 2 ośrodkach izolacyjnych tj. powietrze o ciśnieniu atmosferycznym oraz w oleju mineralnym. Oprócz sposobu na wykrycie promieniowania rentgenowskiego, autor próbuje zmierzyć energię radiacji w trakcie opisywanych zjawisk.

Pomiary wykonane w trakcie prac w laboratorium Wysokich Napięć Instytutu Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej są elementem i rozwinięciem dotychczasowych badań nad zjawiskiem wyładowań elektrycznych, które od kilkudziesięciu lat są prowadzone na Politechnice Opolskiej. Wiele metod diagnostycznych stosowanych dzisiaj w elektroenergetyce było z powodzeniem wykorzystywanych i rozwijanych w laboratorium TWN. Najczęściej były to te dotyczące diagnostyki WNZ – mechanizmów powstawania, propagacji oraz detekcji wyładowań niezupełnych w izolatorach lub na ich powierzchni. Z powodzeniem stosowano takie metody jak UHF, metoda akustyczna, elektryczna czy optyczna [10–15, 17, 39, 117, 118].

Dysertacja jest efektem badań sfinansowanych z projektu badawczego PRELUDIUM nr 2014/15/N/ST8/03680 dotowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

2. Cel, zakres, teza pracy

Naukowym celem pracy jest detekcja promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania elektryczne oraz zmierzenie jego energii.

Celem poznawczym pracy doktorskiej jest uszczegółowienie bilansu energetycznego różnych rodzajów promieniowania generowanego podczas wyładowań niepełnych ze szczególnym uwzględnieniem promieniowania jonizacyjnego o dużej energii.

Technicznym celem pracy jest ocena wpływu ośrodka izolacyjnego oraz różnica potencjałów między umownymi elektrodami na możliwość wykrycia oraz zmierzenia energii powstającego promieniowania jonizującego.

Praca ma charakter eksperymentalno–doświadczalny i obejmuje badania laboratoryjne i analizę uzyskanych wyników.

W rozprawie przyjęto następującą tezę:

„Istnieje możliwość wykrycia i określenia widma promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania elektryczne w środowisku o ciśnieniu atmosferycznym”.

3. Mechanizm powstawania i propagacji wyładowań elektrycznych

Warunkiem wystąpienia wyładowania elektrycznego jest obecność czynników jonizacyjnych lub źródeł swobodnych elektronów. W gazach np. w powietrzu, które jest naturalnym dielektrykiem można zaobserwować błyski świetlne i inne towarzyszące im efekty np. akustyczne [10–17]. Rozróżnia się dwie główne grupy wyładowań elektrycznych: wyładowania zupełne (iskra, łuk elektryczny) i niezupełne (ulot, wyładowania snopiaste, ślizgowe) [1, 9, 109, 115, 116]. Możemy również wyróżnić inny podział na wyładowania samodzielne i niesamodzielne. Wyładowania samodzielne to takie wyładowania, które istnieją, bez udziału czynników zewnętrznych, czyli, że o wyładowaniu decydują zjawiska wynikające z przyspieszania elektronów i jonów przez pole elektryczne w samym wyładowaniu. Jeśli wyładowanie jest zasilane przez przyczyny zewnętrzne to mamy do czynienia z wyładowaniami niesamodzielnymi. W powietrzu swobodne elektrony lub jony mogą powstać poprzez oddziaływanie z warunkami zewnętrznymi takimi jak naturalna promieniotwórczość, promieniowanie ultrafioletowe pochodzące ze słońca czy promieniowanie kosmiczne.

3.1. Fizyka zjawiska wyładowań zupełnych

Wyładowania zupełne może występować, jako iskra lub łuk elektryczny oraz powodują małorezystancyjne zwarcie elektrod. Łuk elektryczny to nic innego jak ciągłe wyładowanie elektryczne w gazie o ciśnieniu atmosferycznym lub wyższym. Wyładowanie zachodzi pomiędzy dwiema elektrodami, a cechą charakterystyczną jest mały wewnętrzny opór elektryczny. W obszarze łuku elektrycznego gaz jest silnie zjonizowany i osiąga wysoką temperaturę. W powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym i przy przepływie prądu o wartości 1 Ampera wynosi ona około 5-6 tys. Kelwinów. Zjonizowany gaz jest w postaci plazmy, a jej temperatura zależy od rodzaju gazu, jego ciśnienia, ale również od natężenia prądu i rodzaju elektrod. Łuk elektryczny stosowany w technice i przemyśle używany jest m.in. przy spawaniu czy wytwarzaniu światła w lampach łukowych. Inną odmianą wyładowania zupełnego jest iskra. Od łuku elektrycznego różni się dużym oporem kanału przewodzącego. Ze względu na właściwości fizyczne klasyfikuje się iskry długie i krótkie. Specjalną odmianą iskry jest piorun, czyli bardzo silne wyładowanie elektrostatyczne w atmosferze.

3.2. Zjawisko i klasyfikacja wyładowań niezupełnych

Wyładowanie niezupełne (WZN lub z ang. PD) jest to lokalne przebicie małej części izolacji elektrycznej pod wpływem stresu wywołanego wysokim napięciem. Rozróżnia się 3 rodzaje wyładowań niezupełnych: koronowe, powierzchniowe (Rys. 3.1) i wewnętrzne. Najczęściej występującymi, a zarazem najmniej szkodliwymi są wyładowania koronowe zwane często ulotem. Pojawiają się wtedy, kiedy gradient potencjału przekracza pewną wartość, ale niewystarczającą do przebicia zupełnego czy powstania łuku elektrycznego.



Rys. 3.1 Wyładowania powierzchniowe na izolacji szklanej

Wyładowanie koronowe powstaje zazwyczaj w płynie tzn. w gazach lub cieczech. Wokół elektrody podłączonej do wysokiego napięcia jonizują się atomy i cząstki i powstaje plazma. W trakcie trwania wyładowań koronowych wytwarzany jest ozon. Wyładowania koronowe generują zakłócenia w postaci fal dźwiękowych oraz promieniowania elektromagnetycznego i nie są pożądanym zjawiskiem w elektrotechnice przez straty energii czy zakłócenia, wytwarzanie szkodliwego ozonu oraz uszkodzają izolację. Wyładowania snopiące jest to rodzaj pośredni pomiędzy ulotem a iskrą elektryczną. Przyjmuje postać świetlistych smug spływających z ostrza (elektrody). Powierzchniowe wyładowania niezupełne występują na powierzchni elementów izolacyjnych. Powstają najczęściej w wyniku uszkodzeń izolacji czy złych warunków pracy np. dużej wilgoci czy zanieczyszczenia powierzchni. Tak jak w przypadku wyładowań koronowych te powierzchniowe także generują fale elektromagnetyczne, dźwiękowe oraz generują ozon. Są znacznie groźniejsze niż wyładowania

koronowe, ponieważ są bardziej energetyczne i prowadzą często do niszczenia izolacji np. poprzez zwęglenie części izolacji i przyspieszanie jej erozji. Tzw. drzewienie izolacji to ścieżki przewodzące powodujące zmniejszenie efektywnej drogi upływu a w konsekwencji do wyładowania zupełnego. Wyładowania niezupełne wewnętrzne są jeszcze bardziej groźne ze względu na to, że nie można ich już zidentyfikować gołym okiem bez specjalistycznych przyrządów. Występują one wewnątrz izolacji, a wyładowania powstają w pęcherzykach powietrznych wewnątrz uszkodzonej izolacji. Na jakość izolacji wpływ ma nie tylko wyładowanie niezupełne, ale również, jakość użytego materiału, procesy produkcyjne i wiek izolacji. W praktyce są to najrzadziej spotykane wyładowania niezupełne.

3.3. Metody detekcji wyładowań elektrycznych

Problem występowania wyładowań elektrycznych i ich wpływ na technologię wysokich napięć sprawił, że opracowano wiele metod do detekcji tych zjawisk fizycznych. Wcześniejsze wykrycie wyładowań powoduje zmniejszenie zagrożenia, zmniejszenie strat energii oraz strat ekonomicznych, dlatego tak ważna jest diagnostyka urządzeń i obiektów elektrotechnicznych. Istniejące metody można podzielić na inwazyjne i nieinwazyjne. Metody inwazyjne wykorzystują bezpośrednie podłączenie do badanych obiektów i dzięki temu prądy wyładowań niezupełnych mogą być wykryte z dużą precyzją. Metody nieinwazyjne oferują mniejszą dokładność jednak szybszą i wygodniejszą możliwość wykrycia WNZ. Wśród metod wyróżnić można metodę chromatografii gazowej, emisji akustycznej, pomiaru światła emitowanego przez WNZ [10, 15, 39], pomiaru ciepła powstającego wskutek wyładowań niezupełnych, pomiaru zmian ciśnienia w obszarze wyładowań niezupełnych oraz szereg metod elektrycznych: pomiar ładunku pozornego, zakłóceń radioelektrycznych, średniego kwadratu ładunków, pomiar mostkowy oraz z użyciem watomierza. Przykładowy kondensator do badań metodą elektryczną przedstawiono na rysunku 3.2.

Wykonano wiele badań, prób i eksperymentów, aby znaleźć odpowiednie metody badawcze. Wiele z nich jest nadal rozwijanych [13, 88] oraz są tworzone nowe metody w oparciu o nowo zarejestrowane zjawiska fizyczne towarzyszące wyładowaniom niezupełnym.

Sarathi i in. [87] badają wyładowania niezupełne w oleju transformatorowym z użyciem sondy UHF przy dużej składowej stałej napięcia. W badaniach wykorzystywali układ dwóch cylindrycznych elektrod o różnych średnicach zanurzonych w oleju mineralnym. Napięcie zmienne zmieniało się w zakresie od 0 do 50 kV. Napięcie stałe było zmieniane od 0 do 100 kV. Potwierdzono, że wyładowania niezupełne po przyłożeniu wysokiego napięcia stałego są mniejsze niż pod napięciem zmiennym. Przykładowa sonda pomiarowa dla tej metody widoczna jest na rysunku 3.3. Metoda UHF wykorzystywana jest również w połączeniu z mierzaniem natężenia prądu w wyładowaniu niezupełnym. Celem tego badania jest znalezienie korelacji pomiędzy sygnałem

wysokoczęstotliwościowym a rodzajem defektu, który generuje WNZ. Eksperyment przeprowadzony w oleju mineralnym, w którym umieszczono układ elektrod symulujące znane defekty: wtrącenia metalowych elementów, przerwa w obwodzie. W badaniach używano dwóch czujników, które jednocześnie rejestrowały sygnał UHF o zakresie 3GHz. Wykazano, że korelacja pomiędzy sygnałem UHF, a energią wyładowania silnie zależy od występującego defektu. Stwierdzono również różne kształty sygnałów UHF w zależności od źródła WNZ [18, 84].



Rys. 3.2 Kondensator do badań metodą elektryczną

Metoda UHF wykorzystywana jest również do wykrywania WNZ w innych cieczach izolacyjnych np. w ciekłym azocie [85], lub urządzeniach chłodzonych ciekłym azotem [108]. Zauważono, że potencjał cząsteczki znajdującej się na barierze dielektrycznej jest znacznie wyższy w porównaniu do cząstek na elektrodzie uziemionej. W czasie występowania wyładowań niepełnych cząsteczka przesuwa się z bariery dielektrycznej do środka osi elektrody, co powoduje wypromieniowanie sygnału UHF. Różni się on od sygnału, który jest generowany w czasie zwykłego przemieszczania się cząstek w trakcie występowania WNZ. Jeśli cząstki znajdą się w polu pomiędzy elektrodą o wysokim potencjale i izolatorem w pewnym momencie następuje załamanie się ruchu tych cząsteczek i przemieszczają się one w kierunku od osi elektrody, a sygnał UHF jest podobny do sygnału

generowanego przez wyładowania koronowe. Badania wykazały również, że pasmo rejestrowanych sygnałów UHF jest niezależne od ciśnienia powietrza w obszarze badań [86, 89]. Badania na wyładowaniach koronowych prezentowane są m.in. w [1, 93, 112]. W [1] autorzy skupiają się na badaniu materiałowym kompozytowych izolatorów, na których generowane są wyładowania niezupełne. Testowane obiekty różnią się kształtem i wymiarami, co skutkuje odmiennym rozkładem pola elektromagnetycznego wokół w czasie wyładowań.



Rys. 3.3 Sonda UHF do badań nad wyładowaniami niezupełnymi

Metoda UHF jest rozwijana w wielu ośrodkach na świecie [19–21, 70]. Tworzone są nowe anteny do rejestracji sygnału wysokoczęstotliwościowego pochodzącego z wyładowań niezupełnych w gazach izolacyjnych [42, 47, 59, 77, 114, 119] i innych środowiskach pomiarowych [45, 68].

Metoda UHF jest wykorzystywana również do badań nad ważnymi elementami urządzeń elektrycznych np. rdzenia transformatora. Istnieje możliwość, że pole elektromagnetyczne wytwarzane w czasie pracy transformatora zakłóca sygnał wysokoczęstotliwościowy i wpływa na uzyskiwane rezultaty pomiarów. W tym celu prowadzone są badania symulacyjne, aby móc porównywać wyniki i wpływ fali elektromagnetycznej na uzyskane rezultaty pomiarów na obiektach rzeczywistych [82].

Metodę emisji akustycznej łączy się również z możliwością rozpoznania podstawowych rodzajów WNZ za pomocą m.in. sieci neuronowej [12, 100]. Szczegółowym celem badań w pierwszej publikacji było określenie najlepszych deskryptorów do analizy sygnału emisji akustycznej oraz parametrów wejściowych dla sztucznych sieci neuronowych, biorąc pod uwagę skuteczność

rozpoznawania i czas obróbki uzyskanych danych. Również metoda UHF wykorzystuje sieci neuronowe [73].

Istnieje również wiele prac łączących 2 lub więcej metod diagnostycznych i wykrywających wyładowania niezupełne. W [115] autorzy badali wyładowania niezupełne w transformatorach przy użyciu metody akustycznej (AE) oraz połączonej metody elektro-akustycznej (JEAM). W badaniach wykorzystali system pomiarowy DEMA-COMP, który pozwala na badanie sygnałów w paśmie do 2,5 MHz. Zidentyfikowali pasma częstotliwościowe dla różnych typów wyładowań oraz wyznaczyli szereg deskryptorów. Zbadali również korelację pomiędzy pomiarami w różnych punktach. W innych swoich pracach zastosowali połączenie trzech metod: elektrycznej, akustycznej i metody chromatografii gazowej [41]. Urządzenia do badania metodą elektryczną i akustyczną są przedstawione odpowiednio na rysunkach 3.4.



Rys. 3.4 Sonda akustyczna wykorzystywana w badaniach diagnostycznych metodą akustyczną

Metody UHF i akustyczną stosuje się równocześnie również w badaniach nad WNZ w SF₆ [78, 120, 121] oraz w oleju [22, 107]. Innymi cieczami elektroizolacyjnymi, których używa się w badaniach są np. estry [61, 83].

Duża grupa prac badawczych dotyczy monitorowania wyładowań niezupełnych do celów diagnostyki transformatorów dużej mocy. Przykładem takiej pracy są badania Faraga i in. opisane w [38] w których badali wyładowania na podstacji 500kV. Zastosowali przetworniki akustyczne piezoelektryczne o paśmie 70-180 kHz i wzmacnieniu 40 dB. Przeprowadzili kalibrację offline oraz na

obiekcie rzeczywistym. Nowe czujniki piezoelektryczne stosowane są również w badaniach porównawczych ze starszymi metodami [26]. Wyniki prac nad nowymi kanadyjskimi sensorami piezoelektrycznymi są obiecujące głównie z powodów ekonomicznych.

Łączenie metod emisji akustycznej i UHF jest bardzo popularne [23]. Dzięki temu można dużo dokładniej zlokalizować miejsce powstawania WNZ nawet w trudnych warunkach dla pojedynczej z metod. Prace opisujące wykorzystanie metody emisji akustycznej wskazują na jej wiele wad i zalet. Często, aby uzyskać miarodajne wyniki sygnał, który mają odebrać sondy musi być wzmacniany natomiast dzięki niej istnieje możliwość rozpoznawania i lokalizacji WNZ w różnych warunkach. Nie jest wtedy wymagane szczególne wzbudzenie elektryczne w ośrodku a obliczenia są bardzo proste [44].

Bajwa i in. [9] zajęli się określeniem, która z metod wykrywania wyładowań niezupełnych daje najlepsze rezultaty w kwestii jednoznaczności wyników. W tym celu określili nowy deskryptor wg, którego będą oceniać istniejące metody. Wg autorów najkorzystniej wypada stosunek sygnału do szumu, jaki uzyskuje się w badaniach nad tym zagadnieniem.

Deshpande i in. [28] na podstawie 3 różnych typów WNZ występujących w wirnikowych maszynach wysokiego napięcia opracowali tzw. wzorce energii, czyli stosunek energii wyładowań do ich kąta fazowego. Wzory energetyczne są skorelowane z pomiarami $\tan \delta$.

Inną metodą wykorzystywaną do badań na WNZ jest metoda emisji akustycznej. Wykorzystuje się ją do detekcji i lokalizacji m.in. wyładowań koronowych czy wyładowań powierzchniowych [11, 14, 17, 57, 90, 102, 116, 117]. Hekmati [43] również badał wyładowania niezupełne metodą akustyczną. Opracował algorytm heurystyczny, który przewiduje najkrótszą ścieżkę propagacji fali akustycznej generowanej przez WNZ. Dla potwierdzenia swoich prac wykonał badanie eksperymentalne w kadzi z olejem gdzie umieścił czujniki w różnych miejscach i badał czas, w jakim fala akustyczna do nich docierała. Proponowana metoda znacznie zwiększa precyzję określenia lokalizacji wyładowania.

Siebler [95] i in zajmują się badaniem wyładowań niezupełnych za pomocą polimerowych fluoroscencyjnych czujników światłowodowych. Główną zaletą tych czujników jest to, że potrafią wskazać, iż badane zjawisko występuje już po zliczeniu jednego fotonu pochodzącego z takiego źródła. Fałszywe dane (wynikające z pracy detektora) są skutecznie tłumione przy zachowaniu wystarczającej czułości.

Majidi i in. [60] badali WNZ w stałych materiałach izolacyjnych, w powietrzu i w oleju. Nowością zaproponowaną w ich badaniach były trzy nowe typy wstępnej obróbki danych, które zebrali w czasie pomiarów. Korelacja w metodzie FFBP, błąd pomiarowy w metodzie RBF i procentowa zgodność w narzędziu rozpoznawania wzorców nprtool wyniosły odpowiednio 0,9867; 0,0001; 96,4%.

Torrens i in. [16] również zajmują się wykrywaniem WNZ za pomocą metody akustycznej. Czujniki akustyczne są odporne na zakłócenia elektromagnetyczne i zapewniają nieniszczący

i nieinwazyjny sposób przeprowadzania pomiarów. Ich badania skupione są na wykrywaniu wyładowań niezupełnych i ich analizowaniu w czasie rzeczywistym w przewodach energetycznych.

Metoda oparta na technice bezpośredniej detekcji optycznej wyładowań niezupełnych zaproponowana przez Karmakara i in. [48] ma wiele zalet. Dzięki компактным rozmiarom sensor może być umieszczony w każdym miejscu urządzenia wysokonapięciowego, a jej niewrażliwość na pole elektromagnetyczne, dokładność i czułość sprawiają, że dzięki niej możliwe jest zidentyfikowanie lokalizacji WNZ. Do zbudowania czujnika wykorzystano laser helowo-neonowy, światłowód o średnicy 80 μm , fototranzystor oraz wzmacniacz sygnału. Natomiast Wang i in. [111] zaproponowali użycie włókna światłowodu, diody SLED oraz spektrometru.

Koch i in. [50] zajęli się monitorowaniem pojemności i współczynnika strat na przepustach transformatorów WN oraz w tulejach tych transformatorów. Okazało się, że najbardziej awaryjnym elementem są tuleje i stały monitoring on-line tych elementów wpływa na polepszenie wykrywalności awarii w sieciach wysokiego napięcia.

Transformatory wysokonapięciowe nie są wielkim zagrożeniem ekologicznym. Jednak wraz z rozwojem technologicznym również w tym sektorze przemysłu próbuje się zmian, aby były jeszcze bardziej przyjazne dla środowiska. W tym celu prowadzi się badania i testy związane z zastąpieniem olejów transformatorowych innymi cieczami elektroizolacyjnymi. Przykładem takich cieczy są estry naturalne i syntetyczne [61, 83]. W przeprowadzonych badaniach wykazano, że estry mogą zwiększyć żywotność izolacji papierowych w transformatorach w zakresie ich starzenia pod wpływem zawilgocenia. Estry dzięki zdolności absorpcji wilgoci z papieru zwiększają wytrzymałość elektryczną układu.

Metoda emisji akustycznej (AE) jest jedną z podstawowych metod badawczych wyładowań elektrycznych. Stosuje się ją np. do badań transformatorów olejowych w obszarze detekcji wyładowań niezupełnych (WNZ). Metodę oparto na badaniu sygnałów elektroakustycznych za pomocą przetworników. Obecnie udoskonalana jest na kilka sposobów, a jednym z nich jest zamodelowanie zjawiska metodą numeryczną w środowisku COMSOL Multiphysics [118].

Prowadzone są również badania nad wyładowaniami elektrycznymi w przewodach niskiego napięcia. Ponieważ budowa tego typu kabli różni się od budowy przewodów wysokiego i średniego napięcia nie można stosować tych samych metod i kryteriów oceny do diagnostyki kabli niskiego napięcia [24].

Podczas WNZ wytwarzanych w izolacji kabla (polyolophine) zaobserwowano pojawienie się promieniowania rentgenowskiego. W badaniach wykazano, że ów składnik jonizacyjny jest tak zwanym promieniowaniem hamowania, a intensywność rentgenowskich wyładowań niezupełnych jest zależna od ilości atomów gazu występującego w porach gdzie WNZ ma miejsce. Ponadto liczba atomowa Z pierwiastków wchodzących w skład mieszaniny gazów generuje zależność zgodną z teorią Kramersa-Kulenkampffa [71] Zgodnie ze wzorem (1):

$$P = \frac{C(Z(v - v_0) + bZ^4)}{R^2} \quad (1)$$

gdzie:

P - liczba zliczeń aktów jonizacyjnych, **C** - ilość gazu w porach gdzie występuje WNZ,

Z - liczba atomowa pierwiastków gazu, **R** - odległości między atomami pierwiastków

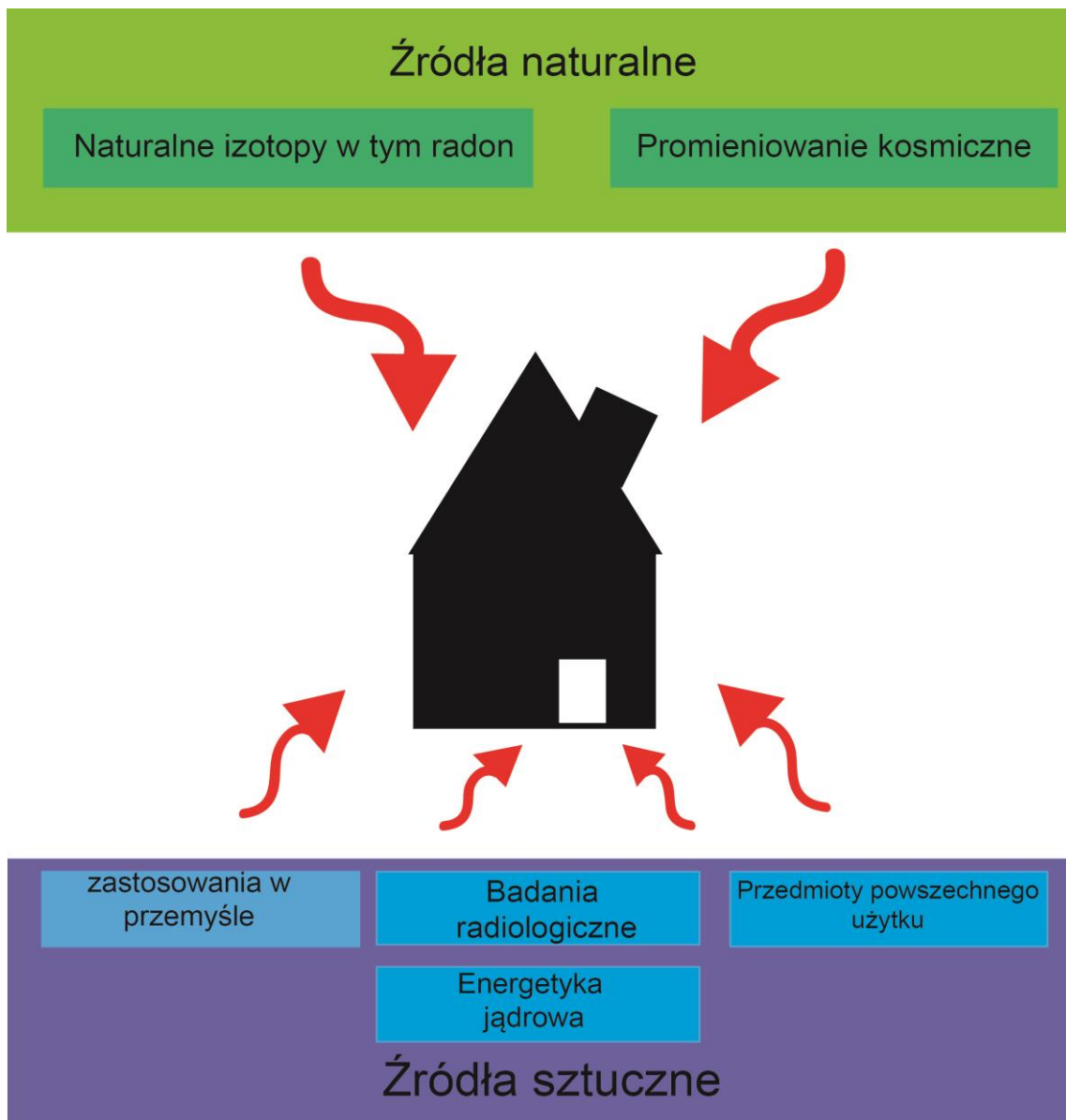
v_0, v – energia atomów wyrażona w częstotliwości drgania

Ważnymi badaniami nad WNZ w kontekście promieniowania rentgenowskiego są prace Sedata [2–5]. Wyzwalanie wyładowań niezupełnych poprzez pulsacyjne napromieniowywanie układu badawczego krótkimi sygnałami rentgenowskimi (50 ns) pozwoliło na wyeliminowanie statystycznych opóźnień czasowych. Dzięki zastosowaniu tego rozwiązania nie trzeba czekać na tzw. elektron startowy, który zainicjuje powstawanie PD. Energia potrzebna do wzbudzenia elektronu pochodzi z promieniowania X [106]. Pozwala to również na wykrycie bardzo małych defektów przestrzennych przy niskich wartościach pola elektromagnetycznego. Sedat i in. [40] badania przeprowadzali na własnej produkcji izolatorach epoksydowych, które nabywały naturalnych defektów produkcyjnych. Fuse i in. również badali za pomocą między innymi promieniowania X poprawę jakości rezystancji i odporności materiałów izolacyjnych na PD. Do badanych próbek dodawano nanokompozyty oraz żywicę. Stwierdzono, że nanowypełniacz poprawia krystaliczność (przejrzystość) żywicy i ogranicza ruchy cząsteczek w izolatorze. Ponadto wykazano, że dodawane nanokompozyty są ułożone tworząc strukturę warstwową, stwarzając barierę przed uderzeniami naładowanych cząstek czy możliwością reakcji izolatora z uwalnianymi gazami.

4. Rodzaje promieniowania jonizującego i ich detekcja

4.1. Źródła i rodzaje promieniowania jonizującego

Promieniotwórczość jest zjawiskiem powszechnym i występującym, na co dzień. Zjawiska naturalne i efekty działalności człowieka ustalają podział promieniotwórczości na naturalną i sztuczną (rys.4.1). Naturalna promieniotwórczość jest obecna na Ziemi wewnątrz materii ożywionej i nieożywionej.



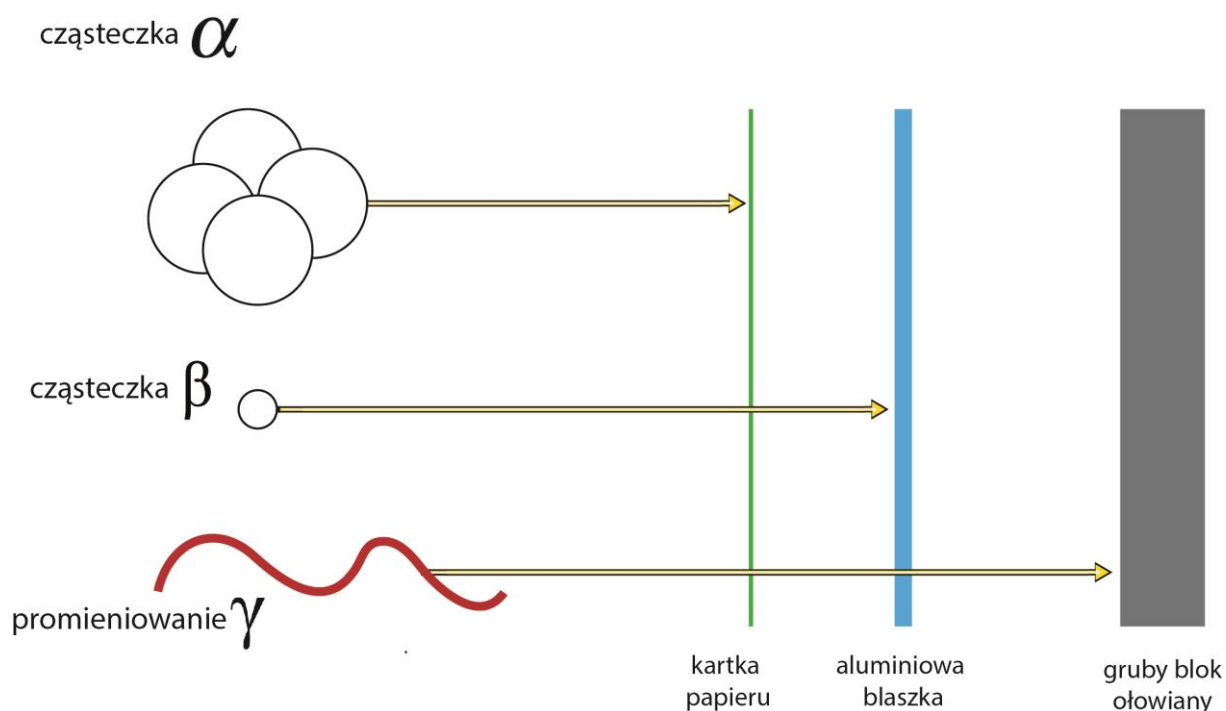
Rys.4.1 Źródła promieniowania jonizującego

To czy pierwiastek jest radioaktywny zależy od jego budowy wewnętrznej, a dokładniej od liczby neutronów. Jeśli ich liczba w jądrze jest zrównoważona w stosunku z liczbą protonów to pierwiastek jest stabilny. Natomiast, jeśli liczba neutronów nie jest zrównoważona to jądro takiego atomu jest niestabilne. Dzieje się tak, dlatego iż neutrony i protony w jądrze są ze sobą powiązane przez bardzo duże siły jądrowe i w atomie o zrównoważonej liczbie neutronów żadna z cząstek nie zdoła się odłączyć. W drugim przypadku jądro posiada nadmiar energii, którą wcześniej czy później wyemituje w postaci fali elektromagnetycznej czy strumienia cząstek. W skład promieniowania jonizującego wchodzi promieniowanie korpuskularne (cząsteczkowe) tj. alfa, beta, neutrony oraz promieniowanie elektromagnetyczne - gamma i promieniowanie X. Odziaływujące z materią promieniowanie zmienia w elektrycznie obojętnych atomach i cząstkach ich ładunki powodując jonizację lub jeśli np. energia kwantu gamma nie była wystarczająca (mniejsza niż siła oddziaływań jądro-elektron) wzbudzenie atomu. Radioaktywność pierwiastków zależy od ilości neutronów w jądrze. Ich zmienna ilość determinuje również czy dany izotop pierwiastka jest jeszcze radioaktywny czy już nie lub czy właśnie się stał. Niestabilne izotopy pierwiastków występujących zarówno naturalnie jak i tych wyprodukowanych przez człowieka są jednym ze źródeł promieniowania jonizującego. Do najbardziej znaczących należą: izotop Wodoru zwany Trytem, Węgiel ^{14}C , Thor ^{232}Th , Uran ^{235}U i ^{238}U czy Pluton ^{239}Pu . Oprócz naturalnie występujących na ziemi radionuklidów i tych, które zostały sztucznie przez człowieka stworzone innymi źródłami na Ziemi są też promieniowanie kosmiczne pochodzące z przemian jądrowych zachodzących gdzieś we wszechświecie, reaktory jądrowe, akceleratory cząstek, bomby i testy jądrowe, aparaty rentgenowskie.

Jak wcześniej wspomniano promieniowanie jonizujące może występować w kilku rodzajach. Promieniowanie alfa jest to jądro Helu o 2 protonach i 2 neutronach - atom pozbawiony elektronów. Promieniowanie beta można podzielić na promieniowanie β^+ i β^- tzw. wychwyty elektronu, gdzie cząsteczkami są pozytony (β^+) i elektrony (β^- i wychwyty). Trzecim rodzajem promieniowania korpuskularnego jest strumień neutronów. Promieniowanie gamma i promieniowanie X to rodzaj promieniowania elektromagnetycznego gdzie nośnikiem energii tzw. kwantów energii są fotony.

Z punktu widzenia fizyki można ten rodzaj radioaktywności rozpatrywać, jako promieniowanie korpuskularno-falowe. Każdy rodzaj promieniowania jonizującego oddziałuje z materią w trochę inny sposób ze względu na swoją przenikliwość. Każde z nich ma różny jej stopień. Do pochłonięcia promieniowania alfa wystarczy kartka papieru lub kilka centymetrów powietrza, ponieważ cząstki alfa są najcięższe ze wszystkich nośników promieniowania i jednocześnie bardzo energetyczne. Dzięki tym własnościom cząstka alfa potrafi silnie zjonizować materię na niewielkich odległościach. Promieniowanie beta (gdzie nośnikiem głównie jest elektron, ponieważ pozyton jest w naszych warunkach krótkożyciowy) ma znacznie dłuższą drogę swobodną i do ich pochłonięcia potrzebny jest grubszy materiał np. folia aluminiowa. Elektrony, które są nośnikiem promieniowania beta są znacznie mniejsze od jąder helu i dzięki temu mają większą przenikliwość. Promieniowaniem, które jest najbardziej rozpoznawanym na świecie przez ludzi jest promieniowanie gamma. Jest to fala elektromagnetyczna,

gdzie nośnikiem energii są fotony. Przenikliwość tego rodzaju promieniowania jest znacznie większa w stosunku to wyżej wymienionych i potrzeba już grubszych osłon z bardzo gęstego materiału, jakim jest ołów, aby zniwelować jego działanie (rys. 4.2).



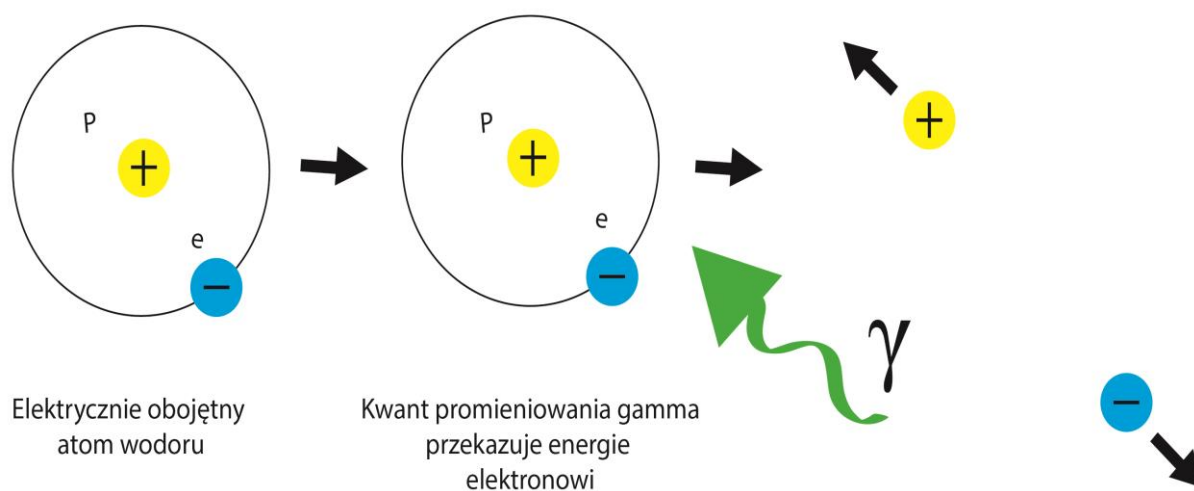
Rys 4.2 Przenikliwość 3 rodzajów promieniowania jonizującego

Oczywiście grubość osłon ołowianych zależy również od energii kwantów gamma, jakie mają zostać pochłonięte. Trochę inaczej jest z neutronami i neutrinami. Neutrino są najbardziej przenikliwe i bardzo rzadko oddziałują z materią. Przenikają one przez każdą materię i przez to jest wiele problemów przy próbach ich detekcji. Natomiast neutrony rozpraszają się w ciałach stałych. Ulegają ztermalizowaniu oddając swoją dużą energię kinetyczną. Dlatego do ich pochłonięcia np. w reaktorach stosuje się osłony wodne z tzw. twardej wody (D_2O - zamiast zwykłego wodoru Protu, stosuje się izotop wodoru Deuter, który posiada w jądrze 1 neutron) [66, 67, 72, 96, 99, 101].

4.2. Zjawisko jonizacji

Jonizacja to zjawisko fizyczne powstawania jonu dodatniego lub ujemnego z elektrycznie obojętnego atomu lub cząsteczki. Może się to odbywać na kilka sposobów m.in. w wyniku zjawiska wychwytu elektronu, na skutek zderzeń obojętnych atomów o dużej energii kinetycznej - tzw. jonizacja termiczna, absorpcja kwantu promieniowania elektromagnetycznego, zderzenie atomu z cząstką o dużej energii kinetycznej (neutron, proton, elektron lub cząstka alfa). Wynikiem tych zjawisk jest

powstawanie swobodnych elektronów wybijanych z powłok walencyjnych i dodatnich jonów, które straciły wybity elektron (rys. 4.3). Zjawiskiem odwrotnym do jonizacji jest rekombinacja, czyli proces odwrotny polegający na zubożeniu jonów. Natomiast, aby zaszła jonizacja za pomocą, któregoś z wyżej wymienionych zjawisk potrzebna jest odpowiednia ilość energii, którą nazywamy energią jonizacji lub potencjałem jonizacyjnym. Energia jonizacji to minimalna energia, którą należy dostarczyć, aby oderwać elektron od atomu. Dla różnych pierwiastków i cząsteczek są to różne wartości energii a jednostką są elektronowolty (eV) [66, 67, 72, 96, 99, 101].

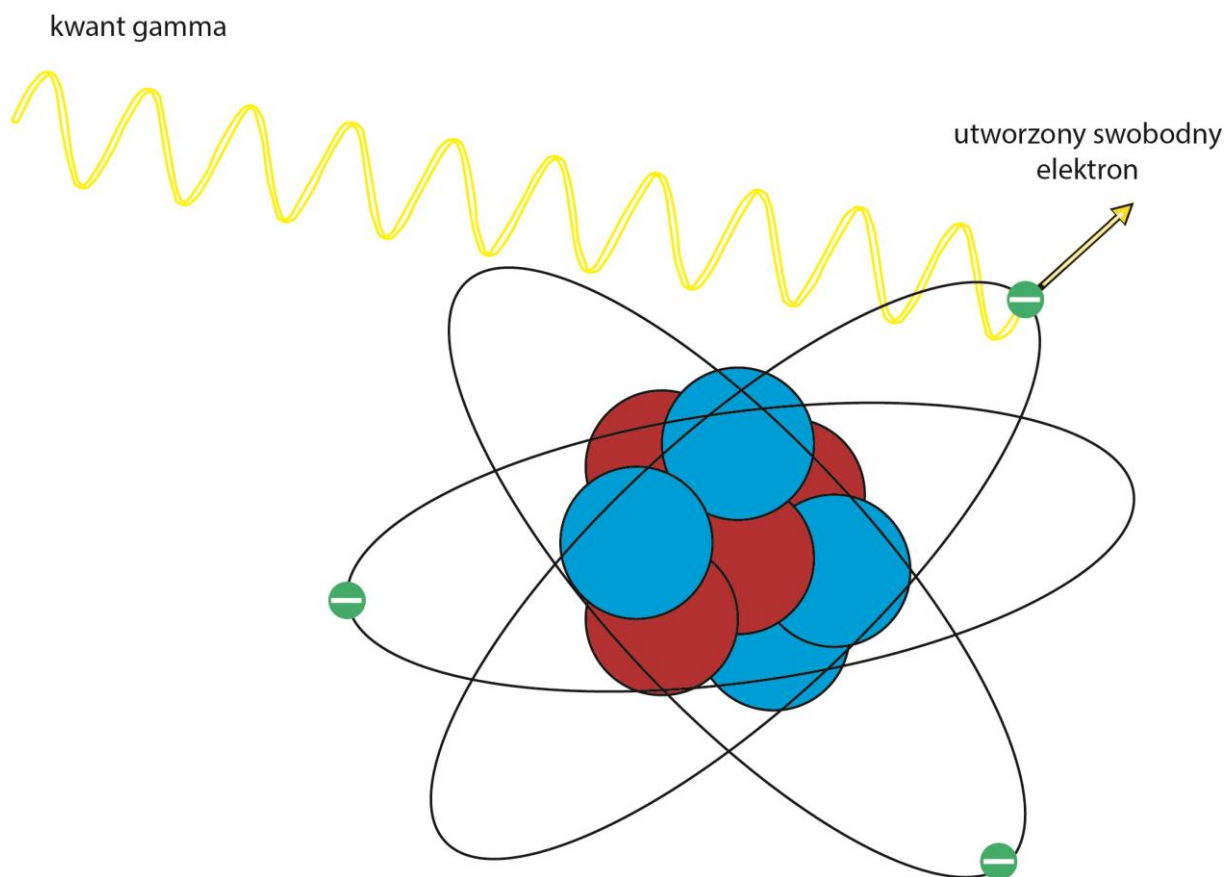


Rys.4.3 Zjawisko jonizacji

4.3. Efekt fotoelektryczny

Efekt fotoelektryczny, czyli zjawisko polegające na emisji elektronów z powierzchni materiału pod wpływem padającego na przedmiot światła ma wiele zastosowań w badaniach naukowych, w przemyśle czy w tworzeniu nowych technologii. Emitowane w zjawisku fotoelektrycznym elektrony nazywa się fotoelektronami. Zauważyć należy, że energia kinetyczna fotoelektronów nie zależy od natężenia światła, a jedynie od częstotliwości (rys 4.4). Energetyczne fotony promieniowania elektromagnetycznego (np. światła widzialnego) przekazują swoją energię elektronom, a te wzbudzone uwalniają się jonizując atom. Dla różnych materiałów, energia potrzebna do tego, aby zaszło zjawisko fotoelektryczne ma różne wartości, a więc wynika z tego, że każdy materiał może reagować na inną częstotliwość światła, a tym samym można stworzyć wiele różnego rodzaju detektorów czułych na konkretne długości światła. Zrozumienie zjawiska efektu fotoelektrycznego przyczyniło się do rozwoju

teorii o korpuskularno-falowej naturze promieniowania elektromagnetycznego (gamma i rentgenowskiego) [74, 80, 91, 103].



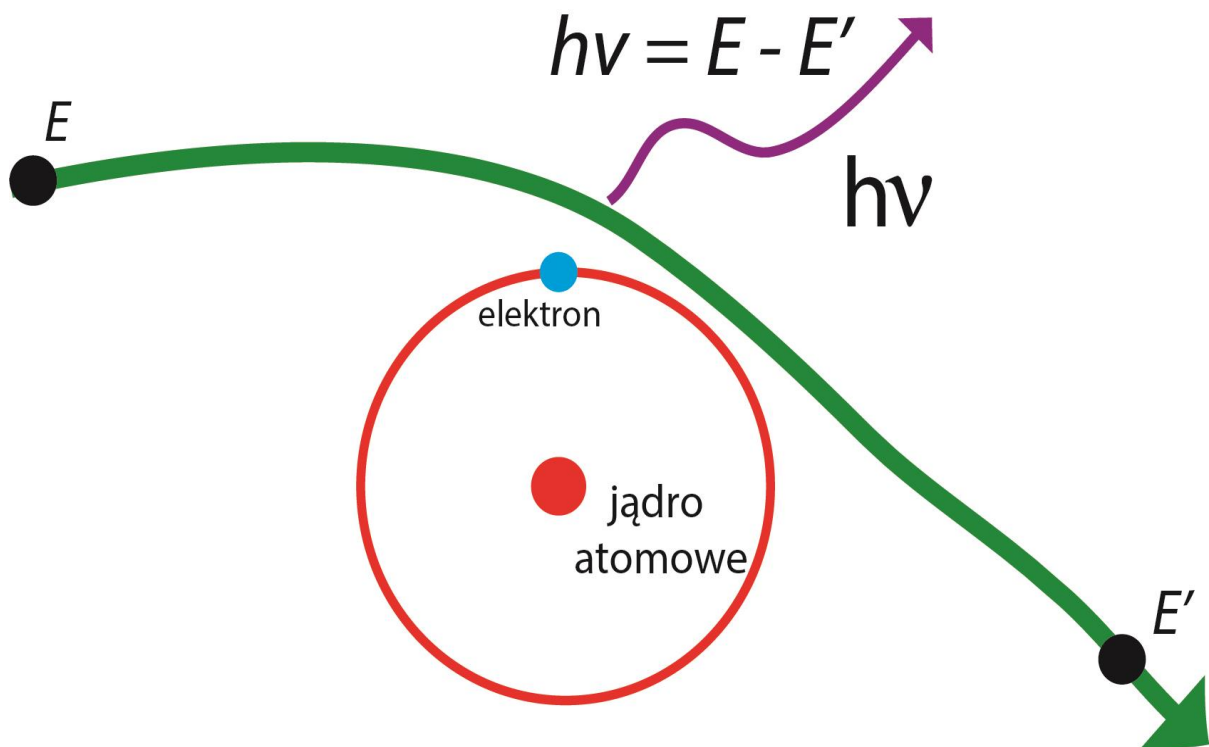
Rys. 4.4 Efekt fotoelektryczny

Istnieje również inny rodzaj efektu fotoelektrycznego zwanego wewnętrznym (w przeciwieństwie do wyżej opisanego zewnętrznego). W tym zjawisku energia fotonów również jest pochłaniana przez elektrony, ale te z wewnętrznych powłok. Powoduje to ich wzbudzenie i przejście na wyższe stany energetyczne, czyli są przenoszone pomiędzy pasmami energetycznymi np. do pasma przewodnictwa i wtedy mówi się o fotoprzewodnictwie. Efekt fotoelektryczny wykorzystywany jest w wielu urządzeniach dostępnych komercyjnie np. w fotokomórkach, bateriach słonecznych czy też w urządzeniach naukowych takich jak fotopowielacz. Badania z udziałem efektu fotoelektrycznego przeprowadzali m.in. Paul i in. [76] wykorzystując go do określania temperatury topnienia. Dla danej energii fotonu wydajność efektu fotoelektrycznego w cząsteczkach gazu w postaci aerozolu zależy od jego geometrii i struktury elektronowej. Drastyczne zmiany w strukturze cząsteczek i w ich właściwościach związanych z powłokami elektronowymi można wywołać za pomocą ogrzewania powyżej temperatury topnienia danego materiału. Autorzy stwierdzili, że pomiary wydajności efektu fotoelektrycznego na cząsteczkę w funkcji temperatury aerozolu może zawierać informację o temperaturze topnienia. Zaletą tej metody jest to, że badania można wykonywać on-line

w wysokiej rozdzielczości czasowej oraz na eksperyment nie ma wpływu oddziaływanie cząsteczek między sobą. Vouagner i Girardeau-Montaut [110] przeprowadzali badania nad zjawiskiem fotoelektrycznym bombardując impulsową wiązką laserową cienką folię węglową. Fotokatody użyte do eksperymentów osadzone były na różnych podłożach metodami osadzania próżniowego, natomiast laser o pulsacji, co pikosekundę emitował światło o długości fali 213 nm. Próbkę naświetlano przy niskich natężeniach wiązki (ok. kilka MW/cm²) w celu uniknięcia wyraźnych zmian strukturalnych na ich powierzchni. Vouagner badał oddziaływanie powierzchni folii węglowej na czyszczenie światłem UV pochodzącym z lasera oraz zanieczyszczenie powietrza wokół pochodzące z emisji elektronów. Najwyższą wydajność kwantową uzyskano z fotokatody z nawodorowanej folii diamentowej zgodnie z niską barierą potencjału na powierzchni materiału. Wartość wydajności jednak maleje po ekspozycji próbki na kontakt z powietrzem. Cienkie folie służące za fotokatody badali również Czerwosch i in. [25]. Folie składające się z nanokryształów niklu umieszczonych w amorficznej matrycy węglowej były poddawane zjawisku fotoelektrycznemu. Informacje o strukturze nanokryształów Ni jak i amorficznej matrycy węglowej uzyskano za pomocą spektroskopii TEM i Ramana. Po oczyszczeniu folii laserem UV udało się obniżyć próg inicjacji efektu fotoelektrycznego (z 2,61 eV do 2,55 eV) oraz zwiększono czułość fotokatody.

4.4. Promieniowanie hamowania

Promieniowanie hamowania (promieniowanie X) nazywane promieniowaniem rentgenowskim to rodzaj promieniowania elektromagnetycznego. Nośnikiem energii są fotony tak jak w przypadku promieniowania gamma. Długość fali mieści się w zakresie od 10 pm do 10 nm, czyli pomiędzy nadfioletem i promieniowaniem gamma. Aczkolwiek częściowo zakresy się pokrywają i aby odróżnić charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie od gamma, jako kryterium klasyfikujące przyjmuje się źródło. X-ray powstaje podczas hamowania wolnych elektronów, a gamma-ray w wyniku rozpadu promieniotwórczego jąder pierwiastków radioaktywnych. Samo promieniowanie rentgenowskie nazywane czasem promieniowaniem hamowania dzieli się na tzw. twarde i miękkie. Zakresy długości fal tych 2 rodzajów wynoszą od 0,1 nm do 10 nm dla miękkiego promieniowania X i od 5 pm do 100 pm dla twardego promieniowania X. Promieniowanie rentgenowskie uzyskuje się poprzez wyhamowywanie rozpędzonych elektronów na materiale o dużej liczbie atomowej. Efektem jest powstanie promieniowania o charakterystyce ciągłej, na którym widoczne są również piki pochodzące od promieniowania charakterystycznego (rys. 4.5).



Rys.4.5 Zjawisko powstawania promieniowania hamowania

Te piki promieniowania charakterystycznego zależą od materiału, z jakiego zrobiona była anoda, ponieważ bombardujące ją rozpędzone elektrony wybijają elektrony z atomów anody. Luki po wybitych elektronach na głębszych powłokach elektronowych pozostają puste do momentu, aż zapełnią je elektrony z wyższej powłoki. Tak jak przy zjawisku jonizacji elektrony przechodząc z wyższego stanu (z wyższych powłok elektronowych) emitują kwant lub kwanty promieniowania rentgenowskiego o charakterystycznej energii. Najbardziej powszechnym zastosowaniem promieniowania X jest generowanie go w lampach rentgenowskich w celach medycznych. Promieniowanie rentgenowskie wykorzystywane jest ogólnie w celu obrazowania wewnętrznej struktury obiektów oraz jest jednym z kryteriów potwierdzenia odkrycia nowego pierwiastka. Każdy pierwiastek chemiczny ma swoje charakterystyczne widmo rentgenowskie [37, 62].

4.4. Metody detekcji promieniowania jonizującego

4.4.1. Liczniki jonizacyjne

Detekcja promieniowania zarówno jądrowego jak i rentgenowskiego opiera się na wykorzystaniu oddziaływań każdego z rodzajów promieniowania z materią. W detektorach wykorzystuje się zarówno procesy fizyczne zachodzące w materii narażonej na promieniowanie jak i na określaniu energii ze źródeł promieniowania oraz kierunku rozchodzenia się nośników. Detektory

możemy podzielić na 3 główne grupy: detektory jonizacyjne, scyntylicyjne i półprzewodnikowe. Dużą grupę detektorów reprezentują liczniki jonizacyjne. Ich działanie polega na rejestracji przepływu prądu przez jony i elektrony wytworzone w gazie w czasie przejścia przez ten gaz cząstki jonizującej go. Gaz umieszczony jest między okładkami kondensatora. Przejście cząstki naładowanej wywołuje impuls prądu, który może zostać zarejestrowany. Wytworzony impuls ma 2 składowe. Szybko narastająca elektronowa i wolno narastająca jonowa. Powodem rozdzielenia impulsu na 2 składowe jest to, że jony są znacznie cięższe i wolniejsze od elektronów.

Wykorzystywane są różne typy liczników jonizacyjnych, a najczęściej stosowane to:

Komory jonizacyjne - zasada ich działania oparta jest na proporcjonalnym wytworzeniu liczby jonów w stosunku do traconej przez cząstkę jonizującą energii. Stosowane są do rejestracji cząstek silnie jonizujących, ponieważ impulsy rejestrowane są bardzo małe (rys.4.6).

Liczniki proporcjonalne - Oparte na efekcie lawinowym. Jony wytworzone pierwotnie mają na tyle dużą energię, że same mogą jonizować inne cząstki lub atomy. Dzięki temu rejestrowany impuls jest znacznie większy niż w komorach jonizacyjnych.

Licznik Geigera-Müllera - najbardziej znany ze wszystkich detektorów również jest licznikiem z rodzaju detektorów jonizacyjnych. Detektor ten rejestruje jedynie przejście przez niego cząstki. Dzięki temu, że pracuje przy wysokich napięciach, a zachodzący efekt lawinowy przebiega niezależnie od jonizacji pierwotnej można dzięki takiemu detektorowi rejestrować promieniowanie każdego rodzaju od alfy przez betę aż do promieniowania elektromagnetycznego. Niestety jego wadą jest to, że nie można zarejestrować energii przechodzącej cząstki. Natomiast jest bardzo dobry, gdy chcemy wykazać natężenie promieniowania - ilość aktów jonizacyjnych.



Rys.4.6 Dozometr DKP-50 oparty na konstrukcji komory jonizacyjnej

4.4.2. Detektory półprzewodnikowe

Kolejną grupą są liczniki półprzewodnikowe. Detektory półprzewodnikowe mają bardzo dobrą energetyczną zdolność rozdzielczą. Cząstka naładowana może przekazać część swojej energii elektronom, powodując ich przejście do pasma przewodzenia. To zjawisko powoduje powstanie pary elektron-dziura. Detektory półprzewodnikowe mają specjalne układy chłodzące, ponieważ muszą pracować w niskich temperaturach. Najpopularniejszym rodzajem detektora obecnie jest licznik scyntylacyjny - w tym detektorze rejestracja promieniowania jądowego polega na obserwacji błysków scyntylacyjnych. Dzięki specjalnym materiałom zwanym scyntylatorami można określić nie tylko ilość impulsów, ale również ich energię. Sam scyntylator nie wystarczy, wykorzystuje się również fotopowielacze i sprzężoną z nim aparaturę elektroniczną. Ma on również inne zalety w porównaniu do detektorów o działaniu jonizacyjnym, gdyż impulsy są znacznie krótsze, co pozwala na rejestrację strumieni o większym natężeniu, a poza tym pracują z bardzo dobrą wydajnością sięgającą 100% dla cząstek cięższych (np alfa) i 10% dla promieniowania gamma.

Zjawiska towarzyszące wyładowaniom elektrycznym są ważnymi informacjami w kontekście energii, a dokładniej udziału procentowego każdego z nich w momencie jej uwalniania w postaci światła, ciepła, fali mechanicznej czy fali elektromagnetycznej wysokiej częstotliwości. Niewielka ilość prac dotyczących wyładowań elektrycznych naturalnych czy też w obiektach wytworzonych przez człowieka dotyka wykrycia, a także zmierzenia promieniowania jonizującego generowanego w trakcie przebiegu ośrodka, który znajduje się pomiędzy punktami o różnym potencjale. Kochkin i in. [51–54] zajmują się badaniem mechanizmów powstawania wyładowań niezupełnych i towarzyszącemu mu promieniowaniu rentgenowskiemu. Prace prowadzone są przy użyciu generatora Marxa o potencjale 1 MV. Szczelina pomiędzy elektrodami wynosi od 1m do 1,5m. Badania wykonywane są w powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym w stałej temperaturze. Wyniki, jakie osiągają zależne są od polaryzacji elektrod. Badanie te są ważne ze względów chociażby na występowanie takich zjawisk w przyrodzie, a mające niebagatelny wpływ na zdrowie i życie ludzkie, np. w czasie uderzenia pioruna w powierzchnię samolotu nie tylko ze względu na pracę maszyny, ale również dawkę promieniowania, jaką otrzymują pasażerowie maszyny. Dotychczasowe prace skupione są na badaniu zjawisk naturalnych w postaci piorunów [7, 31–35, 55, 56, 92, 97] oraz badań w laboratoriach w różnych konfiguracjach elektrod [29, 36, 63, 64, 69, 75, 79].

4.5. Zjawisko scyntylacji i materiały scyntylacyjne

4.5.1. Mechanizm scyntylacji

Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią skutkuje jonizacją lub wzbudzeniem cząstek. W momencie, gdy cząsteczki powracają do stanu podstawowego, emitują energię w postaci

fotonów o częstotliwości w zakresie od ultrafioletu, poprzez światło widzialne, aż do podczerwieni. To zjawisko fizyczne nazywane jest scyntylacją. Czysto teoretycznie według powyższej definicji scyntylatorem nazwać można każdą substancję emitującą światło we wspomnianym zakresie, na skutek jej oddziaływania z promieniowaniem jonizującym. W praktyce jednak istnieje kilka dodatkowych obwarowań, aby można było nazwać konkretną substancję czy materiał scyntylatorem, które zostaną przytoczone w dalszej części rozdziału. Następnym zamiany energii wzbudzonych cząstek na światło jest możliwość ich detekcji za pomocą urządzeń zamieniających światło ze scyntylatora na sygnał elektryczny. Wiele różnych materiałów spełnia warunek emitowania światła pod wpływem promieniowania jonizującego, jednak zazwyczaj produkują niewielką ilość promieniowania scyntylacyjnego.

W praktyce jak wcześniej wspomniano istnieją dodatkowe parametry, które spełniać musi substancja, aby można było ją uznać za scyntylator. Tak, więc scyntylatorami nazywamy te substancje, w których zamiana energii wzbudzenia czy też jonizacji w światło jest bardzo wydajna i przekracza 50%. Dla scyntylatorów organicznych jest to 50-75%, a dla scyntylatorów nieorganicznych może być ona jeszcze wyższa.

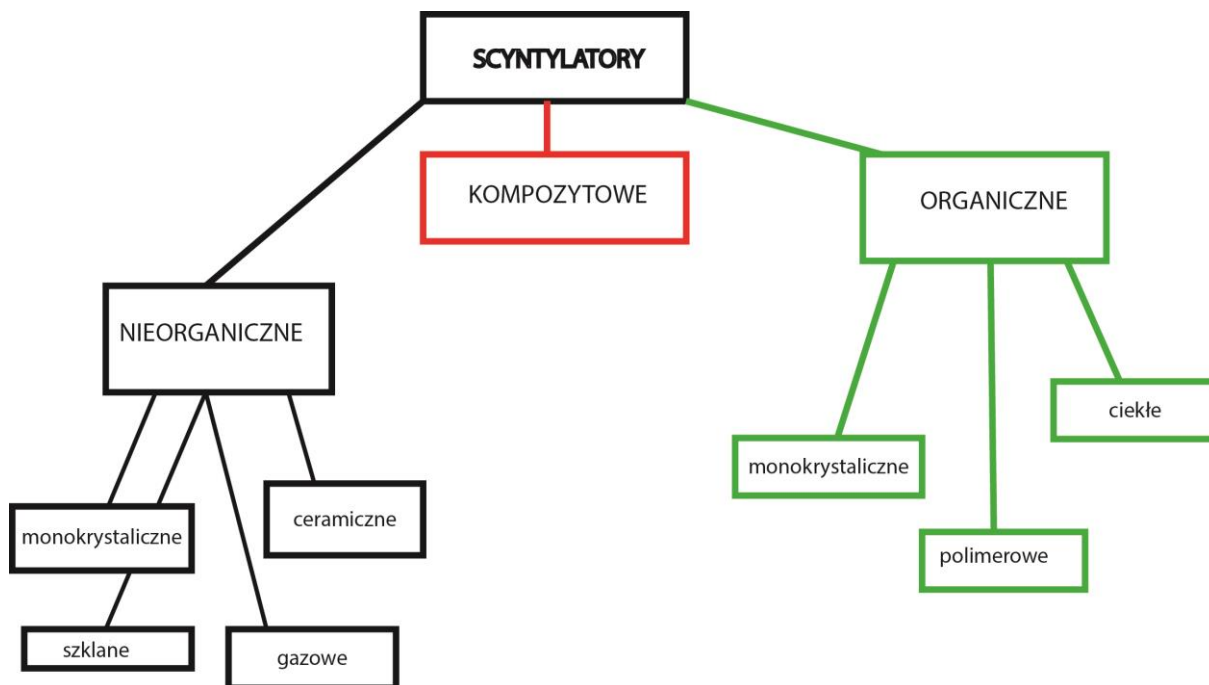
Promieniowanie jonizujące padające na scyntylator, jest przez niego częściowo pochłaniane, a następnie emitowane na skutek zjawiska fluorescencji. Równocześnie zachodząca fosforescencja, która nie jest pożądanym zjawiskiem w procesie scyntylacji trwa znacznie dłużej (setki milisekund), a jej intensywność zanika znacznie dłużej. Absorpcja promieniowania przez cząsteczkę prowadzi do jej przejścia do jednego ze stanów wzbudzonych, a nadmiar energii jest wytracany na różne sposoby (np. oscylacje mechaniczne atomu lub siatki krystalicznej).

Gdy cząsteczka przechodzi ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego, lub stanu niższego wzbudzenia emitowana jest energia w postaci fotonu. Część początkowej energii elektronowej jest tracona, a energia emitowana przy przejściu z poziomu wyższego do niższego jest mniejsza, niż energia zaabsorbowana przez nie podczas promieniowania wzbudzającego. Przejście elektronowe z poziomu wyższego (S_1) na niższy (S_0) to fluorescencja. Emisja światła przez scyntylator jest nie tylko powiązana z materiałem, z którego wykonano scyntylator, ale też przez rodzaj padających na niego cząstek oraz ich energię [8, 98, 105].

4.5.2. Podział scyntylatorów i właściwości fizykochemiczne

Scyntylatory można podzielić na 2 główne grupy: scyntylatory organiczne i nieorganiczne. Osobną grupą są również scyntylatory kompozytowe (rys. 4.7). Główną różnicą między scyntylatorami organicznymi, a nieorganicznymi jest obecność w tych pierwszych struktur policyklicznych z zawartością zdelokalizowanych elektronów. Pierścienie fenyłowe determinują powstawanie światła o długościach fal w zakresie 360 – 500 nm. Scyntylatory nieorganiczne charakteryzują się większą

gęstością oraz mają wyższą wydajność świetlną niż scyntylatory organiczne [6]. Scyntylatory organiczne najczęściej używane są, jako detektory w fizyce wysokich energii, wykrywacze promieniowania na przejściach granicznych, detektory naładowanych cząstek, ciężkich jonów i promieniowania neutronowego.



Rys. 4.7 Podział scyntylatorów.

Wymagania dotyczące innych właściwości, takich jak gęstość, postać i stan skupienia materiału scyntylatora oraz różnorodność kształtów i wymiarów zmieniają się zależnie od zastosowania.

Podstawowe własności fizyczne scyntylatorów **NaI(Tl)** przedstawia tabela 4.1.

Tab. 4.1 Właściwości fizyczne Jodku sodu aktywowanego talem *NaI(Tl)*

Gęstość	3,67 g/cm ³
Współczynnik refrakcji	1,775
Strumień świetlny (referencyjnie do antracenu)	240 %
Długość fali przy maksymalnej emisji	[420 ± 10] nm
Czas zaniku fluorescencji	2,3*10 ⁻⁷ s

Istnieje duża różnorodność scyntylatorów. Dobry scyntylator powinien mieć następujące właściwości:

- Dużą wydajność przetwarzania energii cząstek lub kwantów na energię promieniowania fluorescencji. Innymi słowy ilość emitowanego światła powinna być proporcjonalna do energii zaabsorbowanej przez cząstkę zjonizowaną
- Przezroczystość dla właściwego promieniowania fluorescencji. Materiał powinien być przezroczysty dla długości fali emitowanego światła scyntylacyjnego
- Krótki czas zaniku promieniowania fluorescencji. Impulsy światła powinny być jak najkrótsze i nie powinno być żadnego opóźnienia emisji światła.
- Zgodność składu widmowego scyntylacji z charakterystyką widmową fotokatod oraz współczynnik załamania światła materiału powinna być zbliżona do 1,5, tak, że światło może być łatwo wydobyć scyntylatora

Detektory oparte na scyntylatorach wykorzystuje się w badaniach promieniowania jonizującego, zarówno naturalnego jak i generowanego w laboratoriach. Jacosalem i in. w swojej pracy [46] używali kilku scyntylatorów, owiniętych najróżniejszymi materiałami np. folia odblaskowa, teflon, biała farba, czarna taśma, złotem czy aluminium w celu poprawienia ich wydajności. Zauważyli oni, że najlepsze efekty otrzymano, gdy scyntylator był owinięty folią lustrzaną 3M ze średnią 9,2 fotoelektronu.

Katagiri i in. [49] badali scyntylatory pod kątem optymalnej detekcji - szybkości wykrywania i zliczania, stosunku emitowanych neutronów do emitowanego promieniowania gamma używając źródeł o wysokiej intensywności generowania neutronów. Przebadano m. in. scyntylatory z serii ZnS, krótko żyłowe fosforany, szklane scyntylatory na bazie Boru i Litu.

Inną grupą, która badała scyntylatory na bazie ZnS byli Bin Tang i in. [104]. Ekran, który był zbudowany z kilku elementów opartych na różnym stężeniu siarczku cynku w matrycy polipropylenowej był wystawiony na emisję szybkich neutronów o energii 14 MeV. Natężenie światła wykrywano za pomocą kamery CCD lub kliszy połączonej z ekranem scyntylacyjnym. Wyniki wykazały, że optymalne proporcje ZnS do polipropylenu w stosunku wagowym wynoszą 2: 1 oraz grubość matrycy powinna być około 3mm.

Kumar i Waker [58] testowali plastikowe scyntylatory BC-400 i EJ-212 również w celu określenia optymalnej grubości materiału, aby zbudować detektor do badania niskoenergetycznego promieniowania beta, który również rozróżnia wysokoenergetyczne promieniowanie gamma w środowisku o mieszanym składzie radiacyjnym. Pomiar prowadzono przy użyciu 4 źródeł gamma o różnych energiach od 6 keV do 1,332 MeV oraz źródła promieniowania beta o maksymalnej energii 66 keV pochodzącego z ^{63}Ni . Testowane grubości scyntylatorów zawierały się w przedziale 10 mm do 2500 mm. Odpowiedź układu określano, jako pomiar liczby zintegrowanych zliczeń w funkcji grubości scyntylatora.

Watanabe i in. [113] wykorzystali scyntylator plastikowy BC-408 porównując go z nowo wytworzonym materiałem na bazie ciekłej substancji utwardzanej w temperaturze pokojowej. Nowy produkt zawiera cząsteczki Gadolinu, aby zwiększyć jego czułość na wychwyty neutronów. Źródłem zastosowanym do badań był ^{90}Sr emitujący promieniowanie beta. Testy porównawcze wykonane były przy pomocy 7% Antracenu. Wydajność światła emitowanego do porównania scyntylatorów badano w odległości 18 cm od źródła promieniowania. Oceniono, że nowy materiał z domieszką gadolinu był całkowicie tłumiony przy odległości 50 cm między scyntylatorem, a detektorem światła.

Shirakawa zaproponował i eksperymentalnie przebadał zastosowanie podwójnego układu scyntylatorów [94]. Według jego pomysłu NaI(Tl) i BGO ułożone jeden za drugim zwiększą możliwości detekcyjne promieniowania gamma skierowanego pod kątem od 0 do 90°. Jako źródła promieniowania użyto popularnego ^{137}Cs , który ustawiono w odległości 100 cm od detektora pod kątem 0°. Pomiar promieniowania trwał 60 sekund. Następnie zmieniano kąt padania wiązki gamma o 10°. Układ złożony z 2 różnych scyntylatorów mających różne rozdzielczości zwiększył możliwości detekcyjne promieniowania gamma.

Morishita i in. [65] porównywali wydajność różnych scyntylatorów w zestawieniu z dwiema fotodetektorami. Do badań użyto ZnS(Ag) - najpopularniejszego scyntylatora do badań promieniowania alfa ze względu na jego wysoką moc świetlną. Zauważyć należy jednak, że jego rozdzielczość jest słaba, ponieważ materiał ten nie jest transparentny. Kolejnym użytym scyntylatorem był GAGG oraz scyntylator plastikowy NE-102. Posłużyły one, jako wzorzec dla nowego ceramicznego typu materiału nazwanego Cerium domieszkowanego $\text{Gd}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (GPS). Zespół badawczy, jako detektorów świetlnych użył zwykłego fotopowielacza (PMT) oraz krzemowego fotopowielacza (Si-PM). Najefektywniejszymi parami były GPS z PMT oraz GAGG z Si-PM.

Doke i in. [30] przeprowadzili serię eksperymentów na kryształach scyntylacyjnych NaI(Tl) i CsI(Tl) dotyczących energii potrzebnej do wyprodukowania jednego fotonu scyntylacyjnego o maksymalnej wydajności. Celem było znalezienie odpowiedniego modelu do obliczania potrzebnej energii. W wyniku eksperymentu oszacowano tę wartość na $10,8 \pm 2$ eV dla kryształu NaI(Tl) oraz $11,3 \pm 2,1$ eV lub $9,3 \pm 1,7$ eV dla CsI(Tl). Najwyższe wydajności dla obu materiałów oszacowano za pomocą modelu scyntylacyjnego dla gazów szlachetnych w postaci płynu. Średnie energie wg zastosowanego modelu wynosiły $10,6 \pm 0,3$ eV i $11,6 \pm 0,3$ eV dla NaI(Tl) oraz $11,6 \pm 0,3$ eV i $12,5 \pm 0,3$ eV dla CsI(Tl). Wyniki te wskazują, że użyty model scyntylacyjny dla płynnych gazów szlachetnych można stosować w badaniach nieorganicznych kryształów scyntylacyjnych takich jak NaI(Tl) czy CsI(Tl).

Badania nad scyntylatorami obejmują również, tworzenie nowych substancji o takich właściwościach [81] oraz próby głębszego zrozumienia czynników, które wpływają na ograniczenie skuteczności scyntylatorów w różnych warunkach [27].

5. Opis systemu do badania promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania elektryczne

Do generacji i pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego zaprojektowano system, który składa się z trzech układów:

- układ do generacji wyładowań elektrycznych,
- układ do sterowania pulpitem pomiarowym,
- układ do pomiaru promieniowania wysokoenergetycznego.

Układ do generacji wyładowań elektrycznych stanowią:

- zestawy iskierników,
- transformator wysokonapięciowy,
- dzielnik napięcia,
- pulpit sterowniczy.

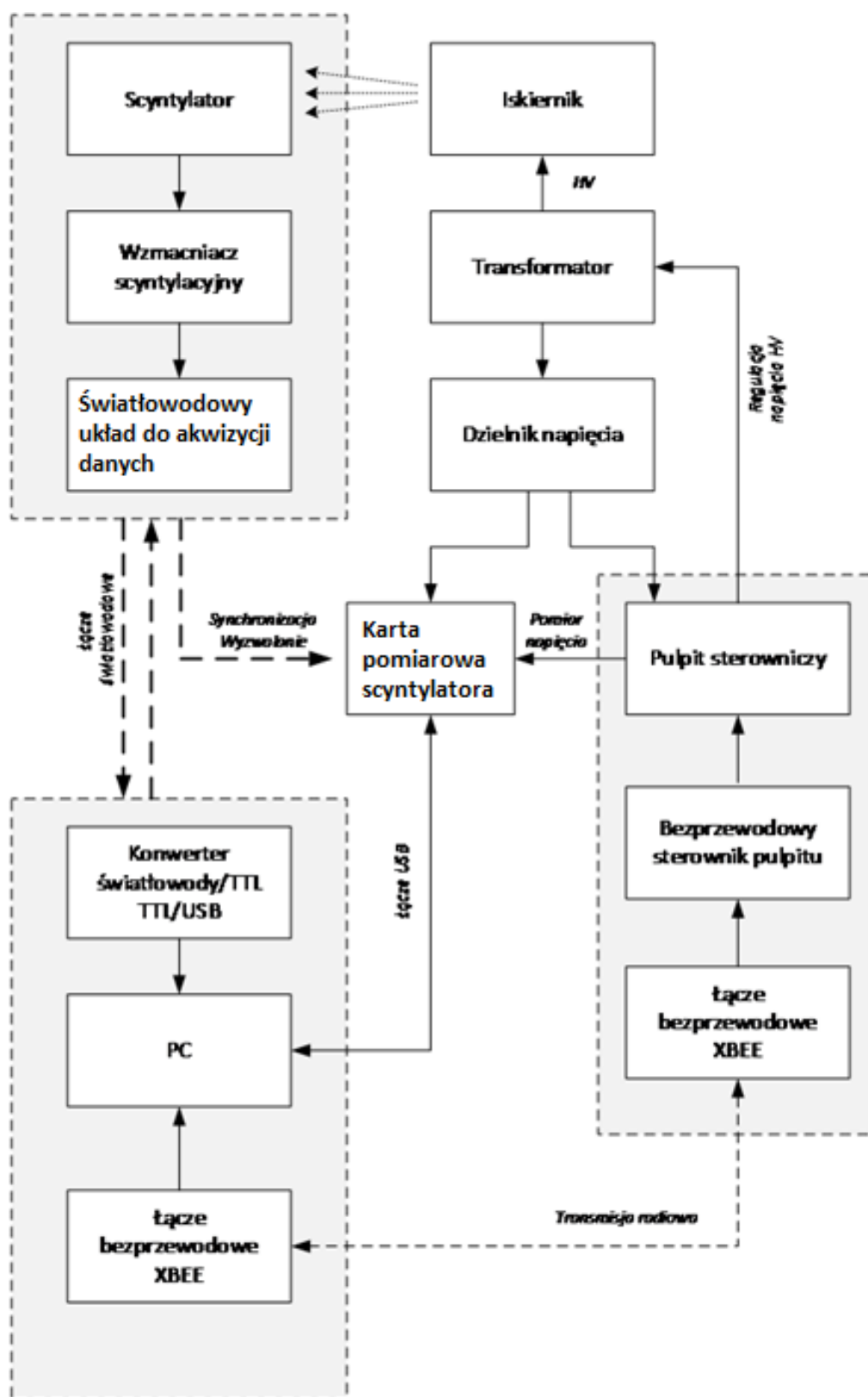
Urządzenia te były dostępne w laboratorium Wysokich Napięć w Instytucie Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej.

Bezprzewodowy układ do sterowania pulpitem powstał w ramach niniejszej pracy, opisany został skrótowo w podrozdziale 5.3.

Układ do pomiaru promieniowania wysokoenergetycznego również został zaprojektowany i skonstruowany w ramach tej dysertacji oraz został opisany w podrozdziale 5.4.

5.1. Ogólny opis działania systemu badawczego

Na rysunku 5.1 zilustrowano schemat blokowy ilustrujący przepływ informacji i danych w systemie badawczym. Podstawowym obiektem jest układ do generacji wyładowań niepełnych i pełnych składający się z iskiernika/zestawu iskierników zasilanych z transformatora wysokonapięciowego. Transformator zasilany i sterowany jest z pulpitu sterowniczego sprzężonego z komputerem przy użyciu bezprzewodowego sterownika z łączem Xbee (łącze radiowe). Iskiernik generuje promieniowanie wysokoenergetyczne, które zamieniane jest na promieniowanie widzialne w kryształach scyntylacyjnych.



Rys. 5. 1 Schemat blokowy przepływu informacji w systemie badawczym

Fotopowielacz zamienia widzialne promieniowanie optyczne na napięciowe szpilki scyntylacyjne, które są następnie wzmacniane oraz filtrowane we wzmacniaczu scyntylatora. Sygnał ten

jest podawany do światłowodowego układu akwizycji danych opartego na mikrokontrolerze PIC32 oraz przetwornik 16-bitowy oraz ponownie w postaci optycznej (cyfrowej) transmitowane do komputera. Równocześnie z pomiarem sygnału scyntylacyjnego mierzone jest napięcie na transformatorze (po stronie wtórnej) przy użyciu dzielnika rezystancyjnego. Do pomiaru wykorzystano kartę pomiarową opartą na procesorze PIC32 synchronizowaną łączem światłowodowym z układem scyntylacyjnym. Sygnały pomiarowe są przekazywane do komputera PC. Do przetwarzania i obróbki danych wykorzystano środowisko MATLAB.

5.2. Układ do generacji wyładowań elektrycznych

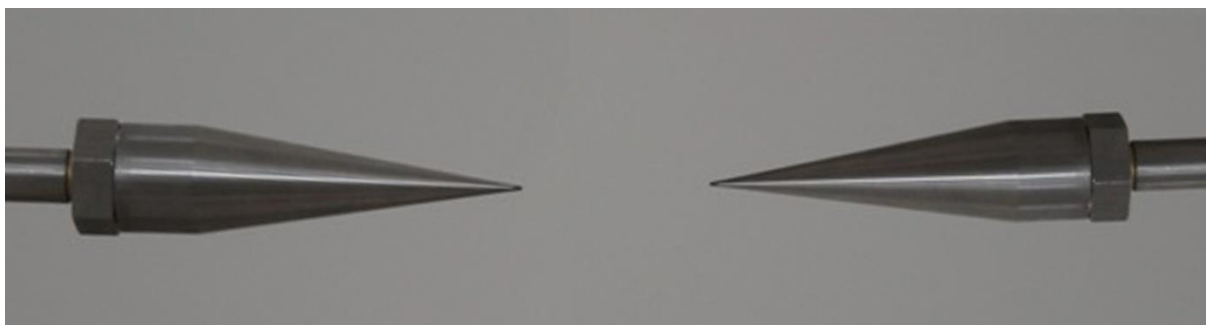
Do wytworzenia promieniowania wysokoenergetycznego zastosowano układ iskierników pomiarowych zasilanych z transformatora wysokonapięciowego.

5.2.1. Iskierniki generujące wyładowania zupełne i niezupełne

Jako iskierników użyto następujących układów:

- Układ ostrze-ostrze,
- Układ ostrze-płyta,
- Układ sfera-sfera ϕ 20 mm,
- Układ sfera-sfera ϕ 50 mm,
- Układ do generowania wyładowań ślizgowych,
- Układ ostrze-ostrze zanurzony w oleju.

Przykładowy układ iskierników użytych do badań został przedstawiony na rysunku 5.2. Układ od badań wyładowań zupełnych i niezupełnych w powietrzu typu ostrze-ostrze.



Rys. 5.2 Przykładowe użyte iskierniki pomiarowych do badań w układach ostrze-ostrze

5.2.2. Transformator generujący wysokie napięcie

Użyty w badaniach transformator był na wyposażeniu laboratorium TWN Politechniki Opolskiej. Jego parametry zostały zestawione w tabeli 5.1. Natomiast zdjęcie samego transformatora znajduje się na rysunku 5.3.



Rys. 5.3 Zdjęcie transformatora wysokonapięciowego

Tabela 5.1 Parametry transformatora wysokonapięciowego

Moc znamionowa ciągła	10	kVA
Napięcie pierwotne	250	V
Napięcie wtórne	120	kV
Moc dorywcza 15-min	12	kVA
Napięcie probiercze 50Hz	144	kV

5.2.3. Dzielnik napięcia przy transformatorze

Dzielnik napięcia użyty w badaniach również był dostępny w laboratorium TWN. Jego parametry zostały zestawione w tabeli 5.2., a zdjęcie dzielników przedstawiono na rysunku 5.4.



Rys. 5.4 Zdjęcie użytych dzielników wysokonapięciowych

Tabela 5.2 Parametry dzielnika wysokonapięciowego

Napięcie pierwotne	150	kV
Napięcie wtórne	150	V
Przekładnia	1:1000	-
Pojemność	-	pF
Rezystancja	1000	MΩ

5.2.4. Pulpit sterowniczy układu wysokonapięciowego

Użyty w badaniach pulpit sterowniczy został pokazany na rysunku 5.5. Pulpit został dodatkowo wyposażony w system bezprzewodowej komunikacji z komputerem. Zwiększyło to dokładność badań oraz pozwoliło zsynchronizować urządzenia pomiarowe (do detekcji scyntylacji oraz pomiary napięcia i natężenia prądu w momencie trwania badania jak i przebicia układu). Szczegółowy opis układu sterowania pulpitem znajduje się w rozdziale 5.3.



Rys. 5.5 Zdjęcie pulpitu sterowniczego

5.3. Bezprzewodowy układ do sterowania pulpitem pomiarowym

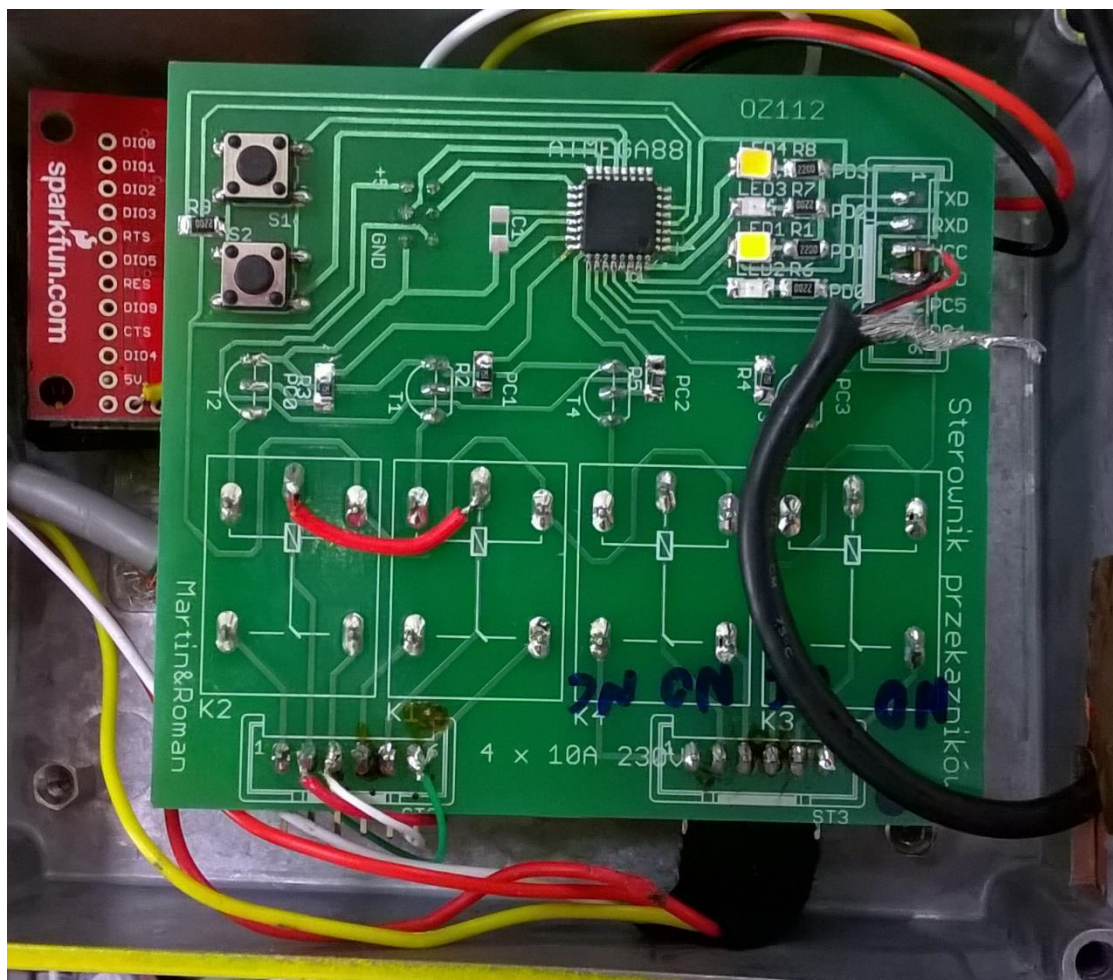
W budowie urządzenia do zdalnego sterowania pulpitem pomiarowym wykorzystano moduł XBee. Moduł ten pozwala na stworzenie bezprzewodowej sieci komunikacyjnej. Zastosowany w konstrukcji model to XBee Pro serii 1. Zdjęcie umieszczono na rysunku 5.6.



Rys. 5.6 Zastosowany moduł XBee Pro

Użyty moduł do bezprzewodowej transmisji o zasięgu 1,6 km, o prędkości przesyłania sygnału 250 kbps, pracuje z częstotliwością 2,4 GHz. Używa protokołu 802.15.4. Moduły w wersji Pro charakteryzują się większą mocą, a co za tym idzie większym zasięgiem w porównaniu do wersji podstawowej. Do badań laboratoryjnych są to wystarczające parametry, ponieważ układ ten odpowiedzialny jest za sterowanie przyrządami pomiarowym nie zaś za sam pomiar. Można jeszcze zwiększyć zasięg pracy używając modułów XBee poprzez wybór wersji pracującej z częstotliwością 900 MHz. W ten sposób można go zwiększyć nawet do 25 km. W zastosowanej wersji użyto anteny u.FL Antenna, która jest konektorem podłączonym do modułu. Dzięki temu można było wyprowadzić antenę poza obudowę, w której znajdują się układy scalone.

Urządzenie do sterowania pulpitem składające się z modułu XBee oraz z układu scalonego zostało zamknięte w metalowej obudowie, z której wyprowadzono przewody zasilające cały układ, przewody do sterowania pulpitem oraz antenę modułu XBee. Wnętrze urządzenia pokazano na rysunku 5.7.



Rys.5.7 Moduł sterujący pulpitem wyposażony w XBee Pro serii 1

Całość została zaprogramowana i sterowana była za pomocą komputera. Oprogramowanie zostało napisane w środowisku MATLAB.

5.4. Układ do pomiaru promieniowania wysokoenergetycznego

5.4.1. Budowa ogólna układu pomiarowego

Układ do pomiaru promieniowania składał się z detektora scyntylacyjnego opartego na kryształach scyntylacyjnych, fotopowielaczu i karty pomiarowej przedstawionych na rysunkach 5.8 i 5.9 oraz z układu ZPS3D (Zwarty, Precyzyjny, Sterowany, 3D) pozwalającego precyzyjnie umieścić detektor w dowolnym miejscu w przestrzeni. ZPS3D to konstrukcja aluminiowa o wymiarach 2x2x2,5m z zamontowanym ramieniem poruszającym się w każdym kierunku w przestrzeni 3D.

Sterowanie ramieniem możliwe jest poprzez zdalny komputer lub ręcznie za pomocą szafy sterującej umieszczonej przy konstrukcji ZPS3D. Ramię przesuwane jest za pomocą silników krokowych z dokładnością do 1mm. Detektor zamontowany jest na ramieniu oraz w czasie pomiaru ustawiany przy elektrodzie ujemnej lub też w zależności od badania w pewnej odległości od tej elektrody.



Rys. 5.8 Detektor scyntylicyjny



Rys. 5.9 Wnętrze detektora scyntylicyjnego. Karta pomiarowa oraz wysokonapięciowy zasilacz fotopowielacza

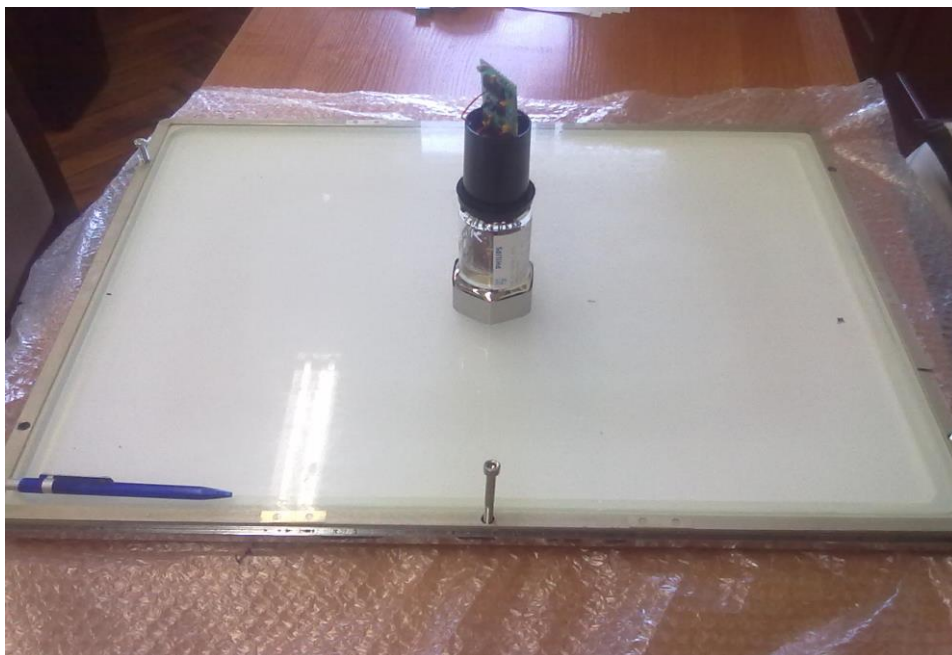
5.4.2. Materiał scyntylacyjny NaI

W budowie detektora scyntylacyjnego zastosowano kryształ scyntylacyjny NaI(Tl) o wymiarach 1,5"x1,5". Scyntylator umieszczony był przed fotopowielaczem w sondzie scyntylacyjnej skierowanej w kierunku źródła promieniowania. Przykładowe używane scyntylatory widnieją na rysunku 5.10.

a)



b)



Rys. 5.10 Kryształ scyntylacyjny NaI(Tl) a) zamknięty w szczelnej obudowie, b) w postaci monokryształu zamkniętego w kasecie używanej w badaniach medycznych

5.4.3. Fotopowielacz z zastosowanym kryształem NaI

Zastosowany w pracach badawczych fotopowielacz firmy Adit model B38B01W o maksymalnym napięciu między katoda i anodą 1500V posiadał system 6 dynod przedstawiony na rysunku 5.11.



Rys. 5.11 Sonda scyntylacyjna z fotopowielaczem

Fotokatoda fotopowielacza to półprzezroczysty stop zwany Bialkali (Sb-K-Cs) dobrze współpracujący z kryształem NaI(Tl). Zakres widmowy pracy fotopowielacza zawiera się od 300 nm do prawie 650 nm długości fali światła widzialnego. Fotopowielacz i scyntylator składały się na sondę scyntylacyjną wyprodukowaną przez firmę Ludlum.

5.4.4. Zasilacz układu wysokonapięciowego detektora scyntylacyjnego

W przeprowadzonych badaniach napięcie zasilające wynosiło 700 V, natomiast zasilanie przedwzmacniacza pochodziło z 3,7 V akumulatora litowo-polimerowego o pojemności 13000 mAh. Zastosowany przedwzmacniacz to GS-1100 PRO firmy Gamma Spectacular (rys. 5.12).

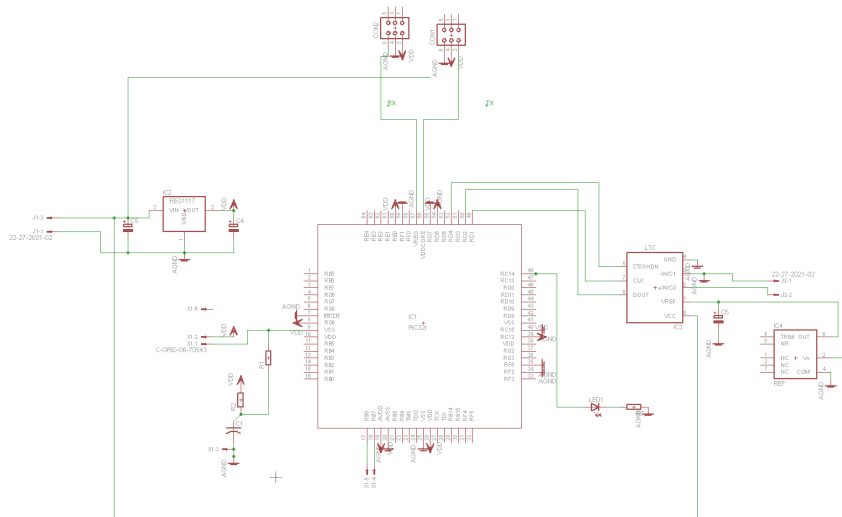


Rys.5.12 Zasilacz wysokonapięciowy scytlatora z wbudowanym wzmacniaczem scytlacyjnym

5.5. Światłowodowy układ pomiarowy do akwizycji szpilek scytlacyjnych

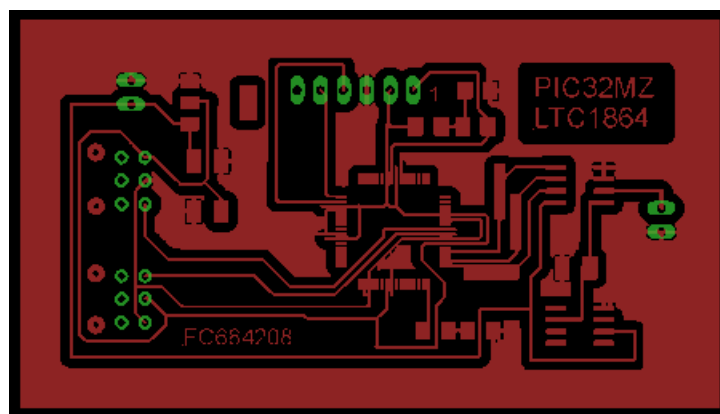
5.5.1. Schemat układu pomiarowego

Dane rejestrowane przez detektor i jego kartę pomiarową są przesyłane do komputera za pomocą światłowodów. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu układu scalonego opartego na mikrokontrolerze PIC32 i module HFBR1521, którego schemat przedstawia rysunek 5.13. Zadaniem układu jest odebranie danych z karty pomiarowej i przekazanie jej w czasie rzeczywistym do komputera. W tym celu układ scalony odbiera dane z karty pomiarowej, następnie są one modulowane na wejściu do łącza światłowodowego, a następnie demodulowane i przesyłane do komputera. Na podstawie opracowanego schematu z rysunku 5.13 zaprojektowano układ scalony zilustrowany na rysunku 5.14.

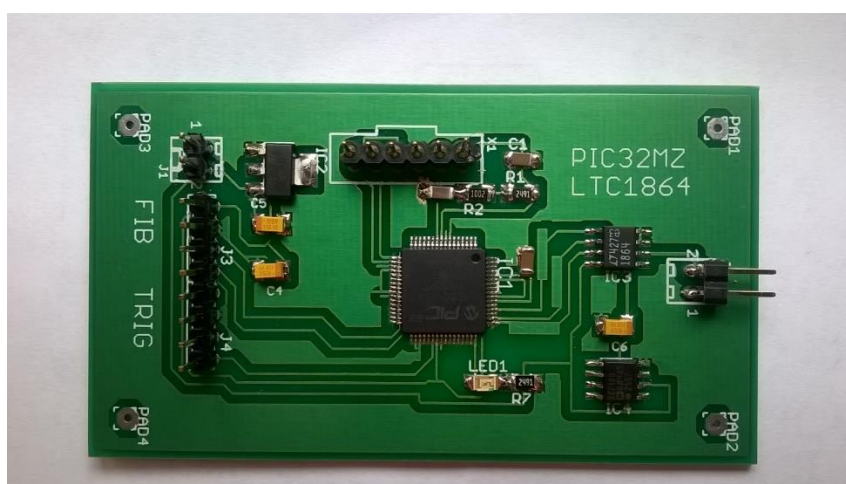


Rys.5.13 Schemat budowy układu scalonego opartego na mikrokontrolerze PIC32

a)

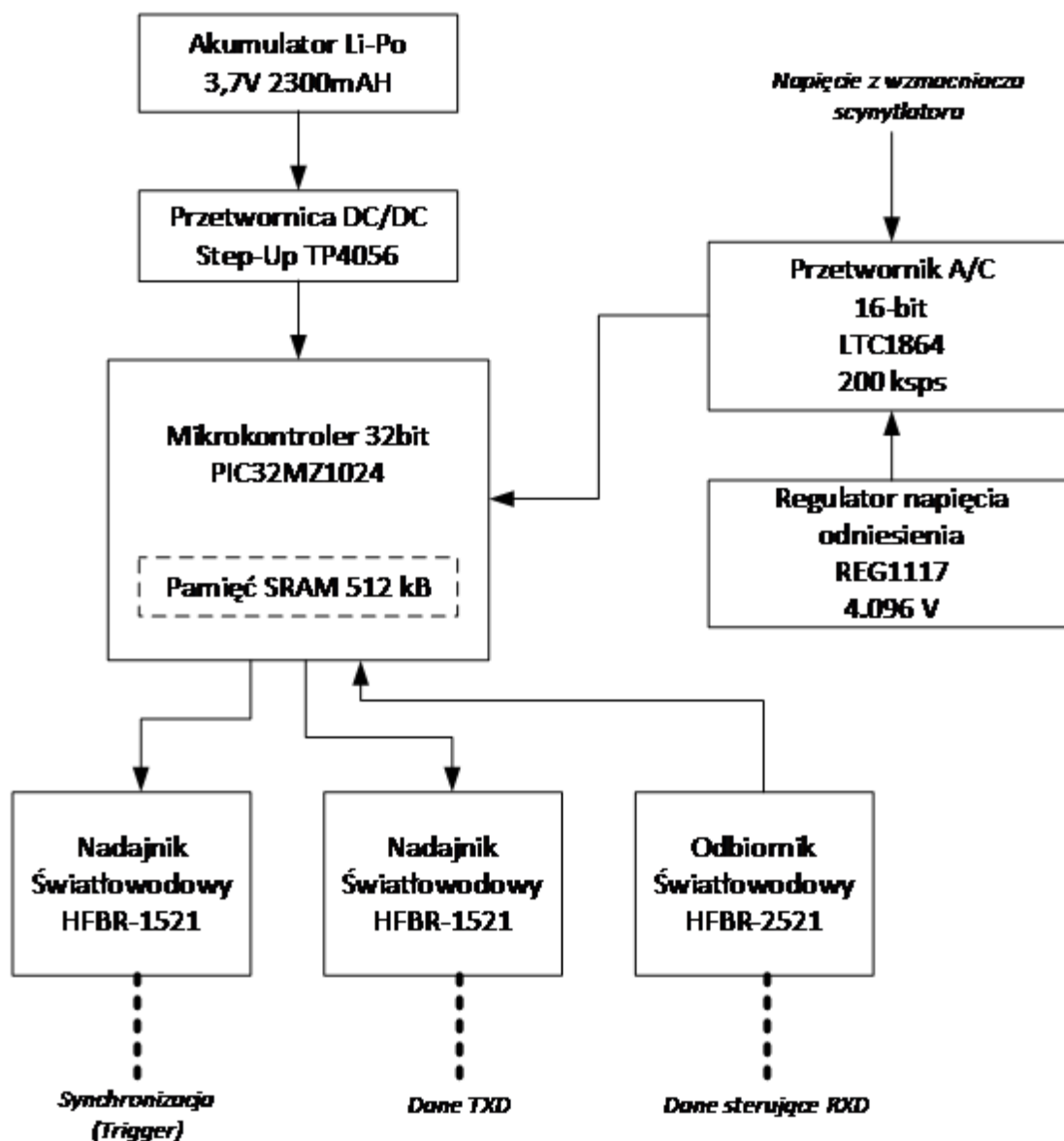


b)



Rys. 5.14 a) Projekt układu scalonego opartego na mikrokontrolerze PIC32, b) wykonana płytki PCB

Cały układ światłowodowy opracowany i skonstruowany zobrazowano w schemacie blokowym widocznym na rysunku 5.15.



Rys.5.15 Schemat blokowy światłowodowego układu do akwizycji danych z scyntylatora

5.5.2. Przetwornik analogowo-cyfrowy i regulator napięcia odniesienia

Do przetwarzania napięciowych szpilek scyntylacyjnych na postać cyfrową użyto przetwornika analogowo-cyfrowego LTC1864 produkcji Linear Technology. Przetwornik ten jest 16-bitowym układem o maksymalnej częstotliwości próbkowania wynoszącej 250 kHz. Prąd zasilania nie przekracza 0,85 mA. Przetwornik wykorzystuje metodę sukcesywnej aproksymacji (SAR) z wykorzystaniem

przełączanych pojemności. Komunikacja z mikrokontrolerem hostem odbywa się przy użyciu interfejsu szeregowego SPI. Układ zasilany jest napięciem 5V. Wykorzystano obudowę SO-8. Układ może pracować w zakresie temperatur od 0 do 70°C. Rozdzielczość efektywna wynosi 14 bitów. Błąd nieliniowości nie przekracza 8 LSB.

5.6. Oprogramowanie układu detekcyjno-pomiarowego

W celu sprawnej obsługi urządzeń skonstruowanych do pomiarów stworzono oprogramowanie obsługujące elektronikę oraz same urządzenia pomiarowe. Kod oprogramowania został napisany w środowisku MATLAB oraz został częściowy przedstawiony w pracy.

```
//#####  
#####  
//##### Program do obsługi przetwornika LTC1864  
#####  
//##### Procesor PIC32MZ1024ECH064 512kB  
#####  
//#####  
#####  
//#####  
#####  
//##### Program pobiera dane z przetwornika z prędkością 200kHz  
#####  
//##### i następnie wysyła paczkę po światłowodzie z dużą  
prędkością#####  
//#####  
#####  
//#####  
#####  
//#####  
#####  
//Przetwornik LTC1864  
//RD2 PIN50 DOUT (input) SDO PD(4)  
//RD4 PIN52 CS (output) CONV PD(16)  
//RD1 PIN49 CLK (output) SCK PD(2)
```

```

#include <xc.h>

//PROCESOR ustawiony na 128 MHZ ok. 50mA, 3.3V

volatile int pomiar=0;
#define MAX_N 200000
volatile long N=1000; //razem próbek
unsigned char memory[2*MAX_N]; //pamięć danych

volatile long indeks=0;

//##### DEVCFG012 #####
#pragma config DEBUG = OFF
#pragma config JTAGEN = OFF
#pragma config TRCEN = OFF
#pragma config BOOTISA = MIPS32
#pragma config FECCCON = OFF_UNLOCKED
#pragma config FSLEEP = OFF
#pragma config DBGPER = PG_ALL
#pragma config EJTAGBEN = NORMAL
#pragma config CP = OFF
#pragma config FPLLLODIV = DIV_4
#pragma config FPLLICLK = PLL_FRC
#pragma config FPLLMULT = MUL_128
#pragma config FNOSC = SPLL
#pragma config DMTINTV = WIN_127_128
#pragma config FSOSCEN = OFF
#pragma config IESO = OFF
#pragma config POSCMOD = EC
#pragma config OSCIOFNC = OFF
#pragma config FCKSM = CSDCMD
#pragma config WDTPS = PS1048576
#pragma config WDTSPGM = STOP
#pragma config FWDTEN = OFF
#pragma config WINDIS = NORMAL
#pragma config FWDTWINSZ = WINSZ_25

```

```

#pragma config DMTCNT =      DMT31
#pragma config FDMTEN =      OFF
#pragma config ICESEL =      ICS_PGx2
#pragma config IOL1WAY =     OFF
#pragma config PMDL1WAY =    OFF
#define b14 16384
#define b15 32768

//#####
#####
//#####  ODCZYT DANYCH Z HOSTA po światłowodzie
//#####
#####

void SEND(unsigned char data)
{
    while( U1STAbits.UTXBF);U1TXREG = data;
}

//#####
#####
//#####  Wysłanie bajtu do hosta po światłowodzie
//#####
#####

unsigned char READ()
{
    while( !U1STAbits.URXDA);
    return (unsigned char) U1RXREG;
}

//#####
#####

```

```

//##### WYSLANIE ZAWARTOSCI PAMIECI POMIAROW (SRAM) DO KOMPUTERA
HOSTA ###
//#####
#####

void SendMemory()
{
    long i;

    for(i=0;i<(2*N);i++)
    {
        while( U1STAbits.UTXBF);
        U1TXREG = memory[i];
    }
    while( !U1STAbits.TRMT);
}

#define LED_ON    LATCSET = b14; //DIODA ON
#define LED_OFF  LATCCLR = b14; //DIODA ON

//#####
#####
//##### PROCEDURA OBSLUGI PRZERWANIA, SYNCHRONIZACJA PRZETWORNIKA
LTC1864 ###
//#####
#####

void __attribute__((vector(_TIMER_4_VECTOR), interrupt(ipl1),
nomips16)) T4Interrupt(void) {
    int i;
    int d1,d2;

    if (pomiar==1)

```

```

{

LATDSET = 2; //CLK=1
LATDSET = 16; //CONV=1
for(i=0;i<60;i++) LATDSET = 16; //CONV=1
LATDCLR = 16; //CONV=0

//odczyt z przetwornika adc ca 4,5us (16 bit)
d1=2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2; LATDSET=2;d1+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2;d1<<=1; LATDSET=2;d1+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2; d1<<=1; LATDSET=2; d1+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2; d1<<=1; LATDSET=2; d1+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2;d1<<=1;LATDSET=2;; d1+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2;d1<<=1;LATDSET=2; d1+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2;d1<<=1;LATDSET=2; d1+=PORTDbits.RD2;

memory[indeks] = (char) (d1);
indeks = indeks + 1;
d2=0;
LATDCLR=2; LATDCLR=2;LATDSET=2; d2+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2;d2<<=1; LATDSET=2;d2+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2;d2<<=1; LATDSET=2;d2+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2; d2<<=1; LATDSET=2; d2+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2; d2<<=1; LATDSET=2; d2+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2;d2<<=1;LATDSET=2;; d2+=PORTDbits.RD2;
LATDCLR=2; LATDCLR=2;d2<<=1;LATDSET=2; d2+=PORTDbits.RD2;
memory[indeks] = (char) (d2);
indeks++;

    if (indeks>=(2*N)) {pomiar=2;}

}

IFS0bits.T4IF = 0; // Clear flag
}

```



```

#define b3 8
#define b0 1

//#####
#####
//#####   PROCEDURA OBSLUGI KOMUNIKACJI Z HOSTEM PRZED POMIAREM
#####
//#####
#####

void PRE_MEASUREMENT_HOST_COMMUNICATION()
{
    unsigned char data,le,a1,a2,a3,mode;

    mode=0;
    le=0;
    while(mode==0)
    {
        data = READ();
        if (data=='M') mode=1;

        if (mode==0)
        {
            if (le==1) {le=0;N = data*1000; SEND(86);}
            if ((le==0)&&(data=='N')) le=1; // N ustawianie
rozmiaru bufora

        }
    }
}

//#####
#####

```

```

//##### PROCEDURA OBSLUGI KOMUNIKACJI Z HOSTEM PO POMIARZE
#####
//umożliwia powtórzenie ponieważ podczas wyładowania mogą powstawać
tzw. fake data
//#####
#####

```

```

void POST_MEASUREMENT_HOST_COMMUNICATION()
{
    unsigned char data,mode;

    mode=0;
    while(mode==0)
    {
        data = READ();
        if (data=='D') SendMemory(); //WYSLANIE DO PC po otrzymaniu
'D'
        if (data=='E') mode=1; //E kończy tryb POST
        if (data=='T') SEND(91); //Test
    }
}
//#####
#####
//##### PROCEDURA OBSLUGI POMIARU
//#####
#####

```

```

void POMIAR()
{
    //POMIAR N PROBEK
    indeks=0;pomiar=1;

    asm volatile("ei");

```

```

    T4CONbits.TON = 1;
    while (pomiar<2);
    T4CONbits.TON = 0;
    asm volatile("di");
}

//#####
#####
//#####  INICJALIZACJA PORTÓW i URZĄDZEŃ
//##### transmisja po światłowodzie 2Mbps 8N1
//#####
#####

void INIT()
{
    N=1000; //razem próbek
    TRISCCLR = b14;
    TRISFCLR = b0;
    LATFSET = b0;

    //TIMER 4
    T4CONbits.TON = 0;
    TMR4 = 0;
    T4CONbits.TCKPS = 0; //prescaler 1:1 (0) 1:8 1:64 1:256 (3)

    PR4=667; //192192 sps (128MHz/PR4)
    T4CONbits.TCS = 0; // Internal
    T4CONbits.T32 = 0; // 16-bit timer
    IPC4bits.T4IP = 1; // Set priority level = 1
    IPC4bits.T4IS = 1; // Set sub-priority level = 1
    IFS0bits.T4IF = 0; // Clear flag
    IEC0bits.T4IE = 1; // Enable interrupt
    T4CONbits.TON = 1;
    // INTCONbits.MVEC = 1; // Multi vectored interrupts

```

```

//LTC 1684
//RD2 PIN50 DOUT (input)
//RD4 PIN52 CS (output)
//RD1 PIN49 CLK (output)
//SPI

TRISDCLR = 2 + 16; //RD1 and RD4 as output
TRISDSET = 4; //RD2 as input

// CNPDDSET=4;
//LATDCLR=4;
//ANSELDCLR=4;

//UART 1
RPF0R = 1; // RF0 = TX
U1STASET = 0x1400; // enable TX and RX
U1BRGSET = 3; //FOSC/16(n+1) = 80000000/(n+1) 2.0Mbps
//U1BRGSET = 68; //FOSC/16(n+1) = 80000000/(n+1) 115200
U1MODESET = 32768 + 0 + 2048 ; //UART ON | 1 STOP BITS | SIMPLEX

//RXD = PIN57 TRCLK/SQICLK/ERXD2/AETXD0/RPF1/RF1
//UART 2
U1RXR = 4; //RPF1
}

//#####
#####
//##### MAIN
//#####
#####

void main()
{

```

```
INIT();

while (1)
{
    LED_ON
    PRE_MEASUREMENT_HOST_COMMUNICATION();
    POMIAR();
    LED_OFF
    SEND('R');// Potwierdzenie zakończenia N pomiarów
    POST_MEASUREMENT_HOST_COMMUNICATION();
}

}
```

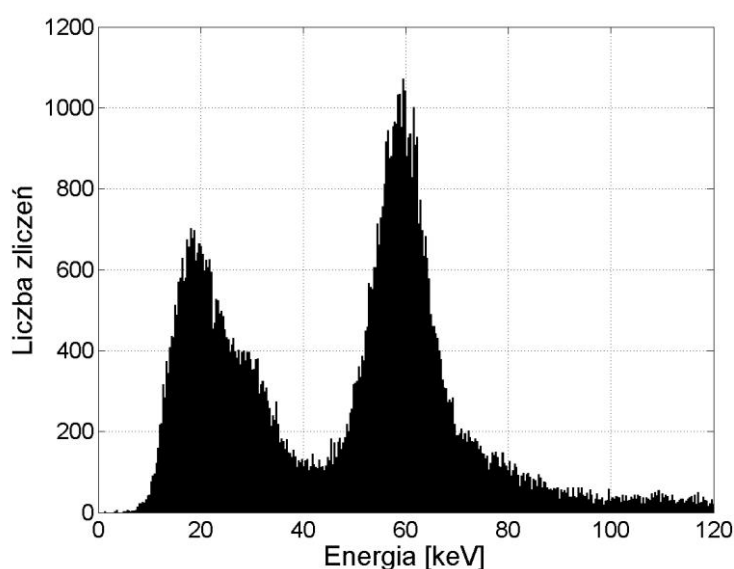
6. Badania promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania niezupełne

6.1. Opis układu pomiarowego do badań wyładowań niezupełnych

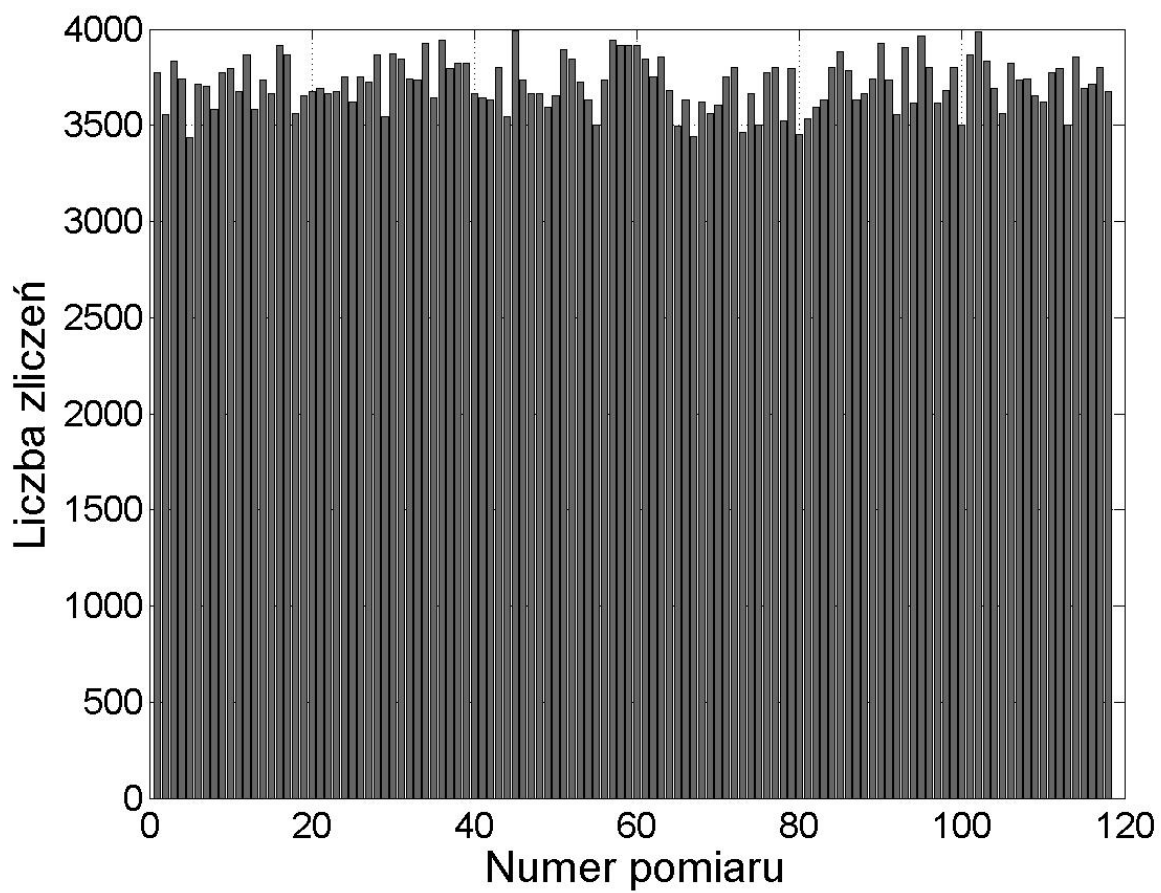
Układ do badań promieniowania generowanego przez wyładowania niezupełne składał się z zestawu iskierników oraz detektora scyntylacyjnego. Zastosowane w tej części badań układy to ostrze-ostrze i sfera-sfera (f 50 mm). Oba układy stosowane były do generowania WNZ w powietrzu natomiast układ ostrze-ostrze wykorzystany był również do badań w oleju. Układ ten w drugiej części badań był zanurzony w kadzi z olejem, a detektor znajdował się nad powierzchnią oleju.

6.2. Sposób przeprowadzenia badań nad WNZ

Badania zaczęto od kalibracji detektora za pomocą źródła promieniowania, jakim w tym przypadku był ameryk ^{241}Am . Zarejestrowane widmo ameryku zostało zobrazowane na rysunku 6.1. Natomiast liczba zliczeń scyntylacji w trakcie sekundowego pomiaru została umieszczona na rysunku 6.2. Następnie przeprowadzono pomiar spektrum energetycznego ameryku w pobliżu pola elektrycznego generowanego przez wyładowania ślizgowe. Odległość detektora od źródła wyładowań wynosiła 30 cm, natomiast ameryk znajdował się pomiędzy detektorem a elektrodą dodatnią w bliskiej odległości od detektora. Zarejestrowane spektrum przedstawiono na rysunku 6.3.

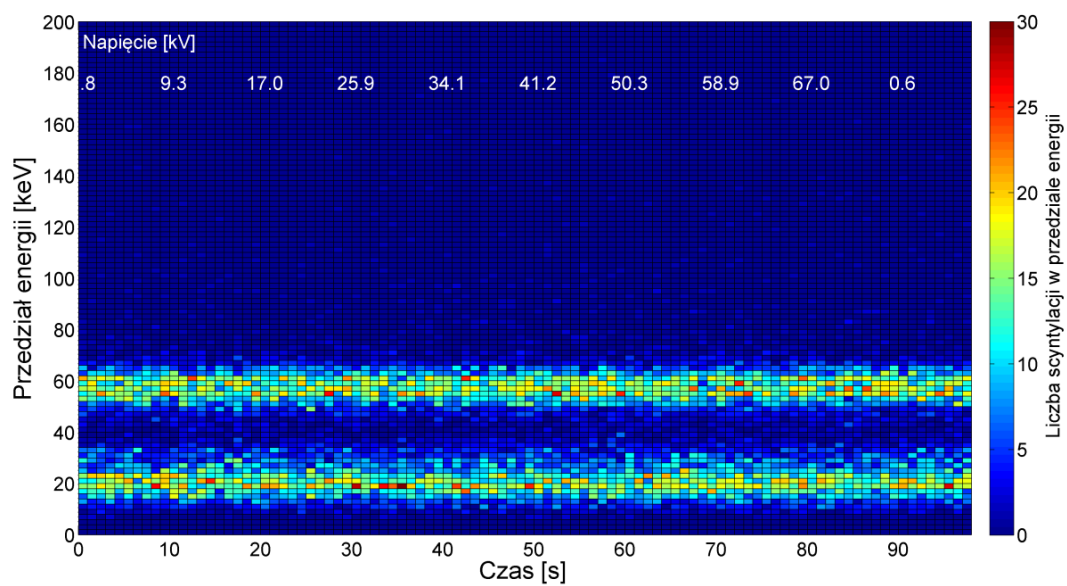


Rys. 6.1. Widmo energetyczne ameryku ^{241}Am zarejestrowane za pomocą detektora

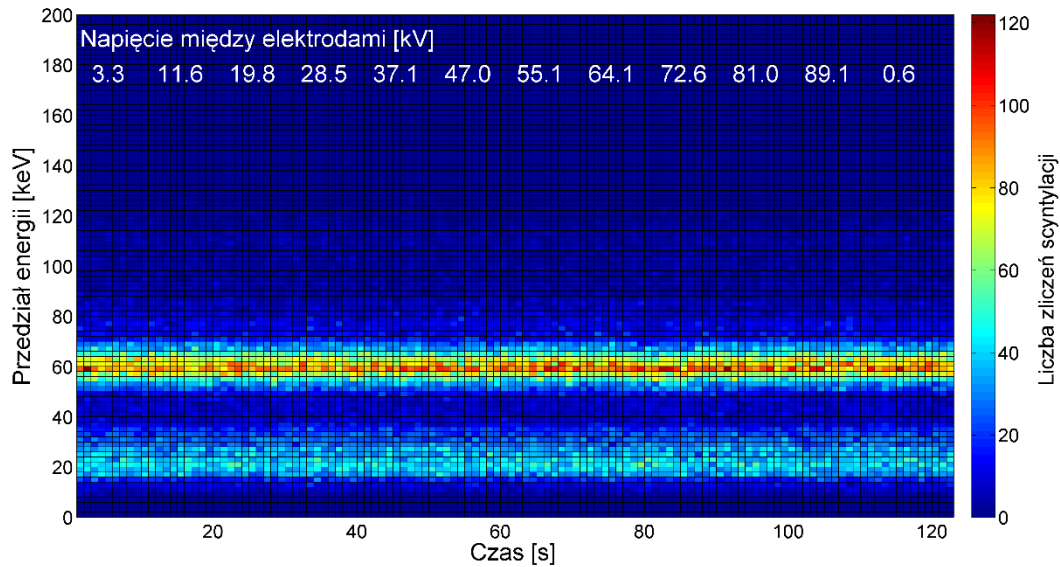


Rys. 6.2. Przebieg liczby zliczeń scyntylacji pochodzących z ameryku

a)



b)



Rys. 6.3. Spektrum energetyczne ameryku w pobliżu wyładowań elektrycznych a) wyładowania w powietrzu, b) wyładowania w oleju

Badania promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania niepełne wykonano dla dwóch ośrodków izolacyjnych. Dla powietrza pod ciśnieniem atmosferycznym oraz dla oleju mineralnego, jakiego używa się w transformatorach energetycznych.

Badania w powietrzu wykonane zostały dla 3 układów generujących WNZ: układ ostrze-ostrze dla odległości między elektrodami od 20 mm do 214 mm zwiększanych o 20 mm dla każdego następnego pomiaru (ostatni pomiar o 14 mm); układ sfera-sfera (średnica kul 50 mm) dla odległości między elektrodami od 20 mm do 200 mm zwiększane, co 20 mm dla każdego następnego pomiaru oraz dla układu generującego wyładowania ślizgowe gdzie izolatorem pomiędzy elektrodami była płyta szklana o grubości 3mm. Badania z wyładowaniami ślizgowymi były przeprowadzone dla trzech różnych odległości detektora od źródła WNZ oraz dla trzech różnych odległości elektrody dodatniej od płyty szklanej (dla każdej odległości detektora od źródła WNZ).

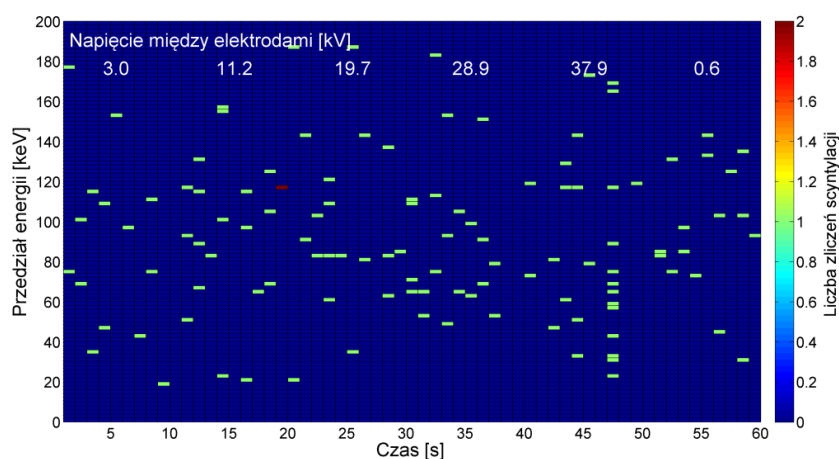
Badania WNZ w oleju opierały się na generowaniu wyładowań niepełnych w układzie ostrze-ostrze zanurzonym w oleju mineralnym umieszczonym w specjalnej kadzi. Badano wyładowania w samym oleju, a także w oleju, do którego wprowadzano pęcherzyki powietrza oraz pęcherzyki argonu.

6.3. Wybrane wyniki pomiarów promieniowania jonizującego generowanego przez WNZ

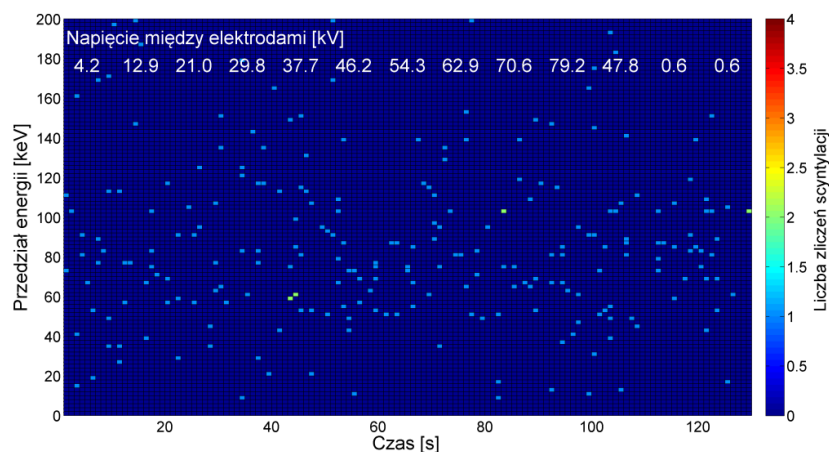
6.3.1. Pomiary promieniowania jonizującego generowanego przez WNZ w powietrzu

Przykładowe zarejestrowane wyniki dla badań w powietrzu zobrazowano na rysunkach 6.4 i 6.5. Pomimo dużej czułości detektora nie zarejestrowano zmiany widma energetycznego ośrodka zarówno dla układu sfera-sfera, układu ostrze-ostrze czy układu do generowania wyładowań ślizgowych. Przykładowe spektrum dla tego ostatniego przedstawiono na rysunku 6.6. Umieszczone na rysunku 6.5 spektra, na których widać zaburzenia mogą być spowodowane lokalnymi przebiciami w ośrodku.

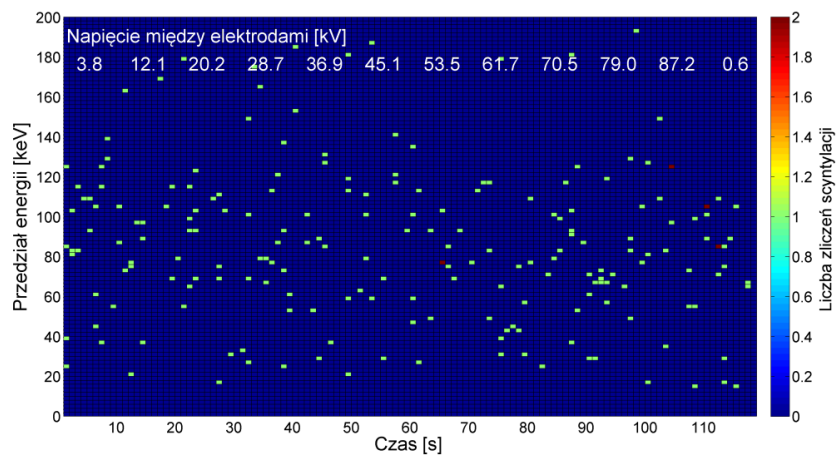
a)



b)

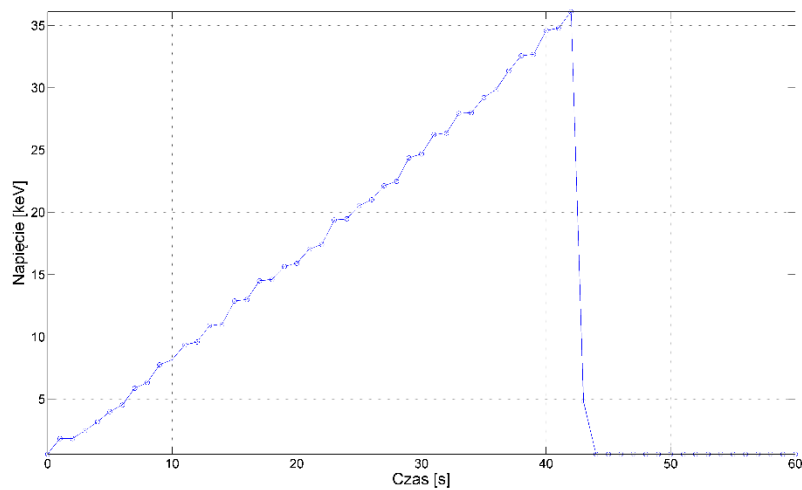
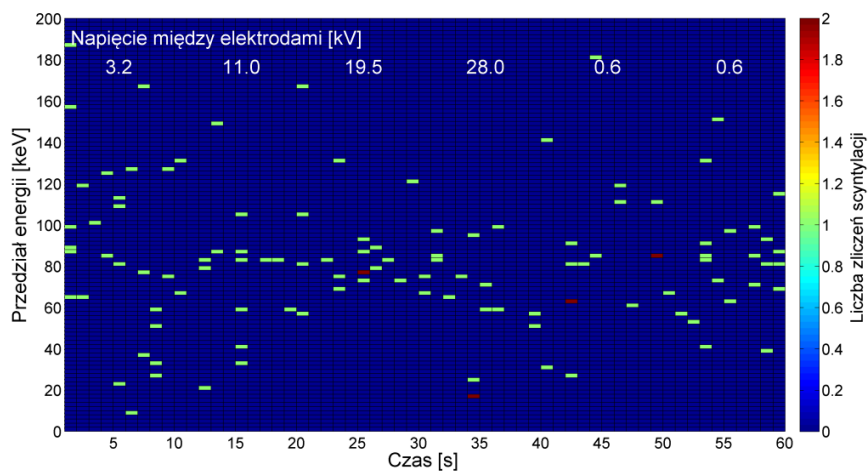


c)

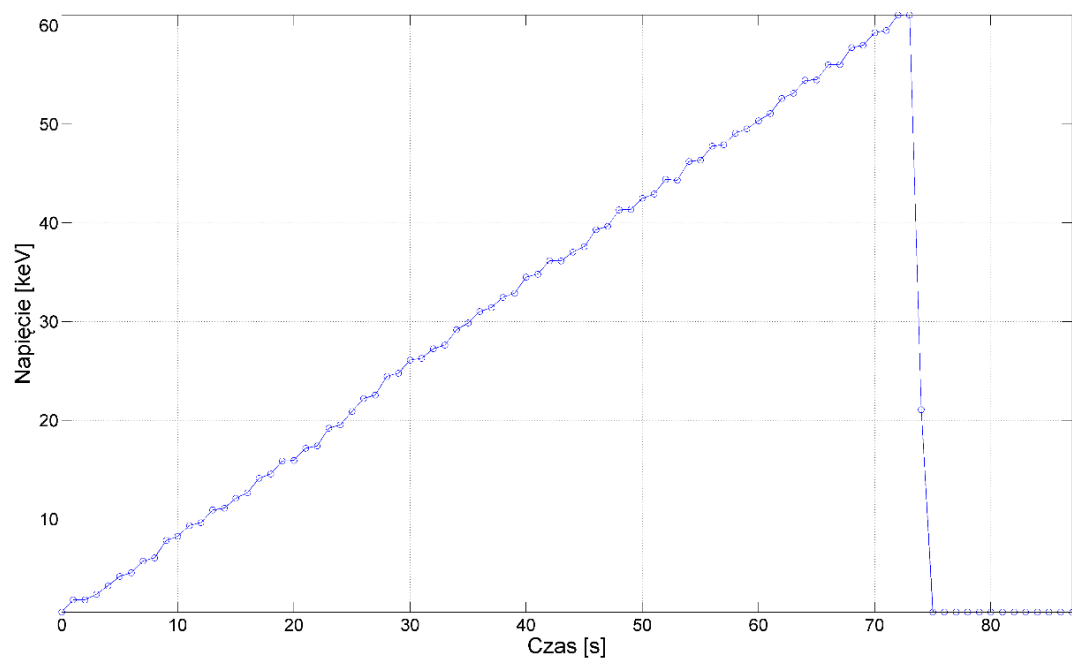
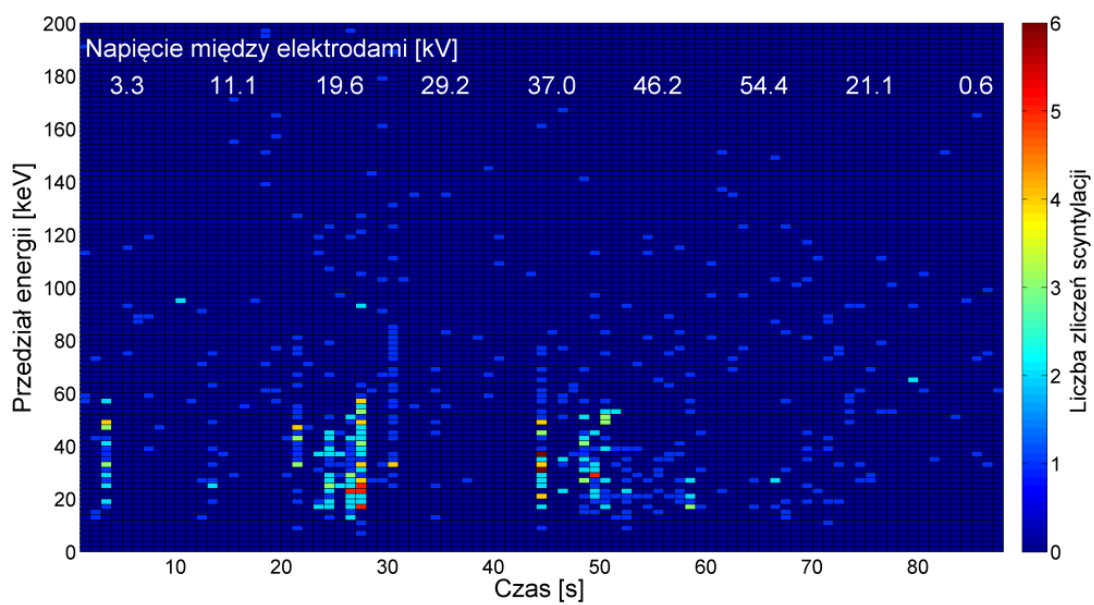


Rys. 6.4. Spektrum energetyczne WNZ w układzie sfera-sfera (ϕ 50 mm) dla odległości między elektrodami: a) 20 mm b) 100 mm c) 200 mm. Ośrodkiem, w którym zarejestrowano spektrum było powietrze o ciśnieniu atmosferycznym.

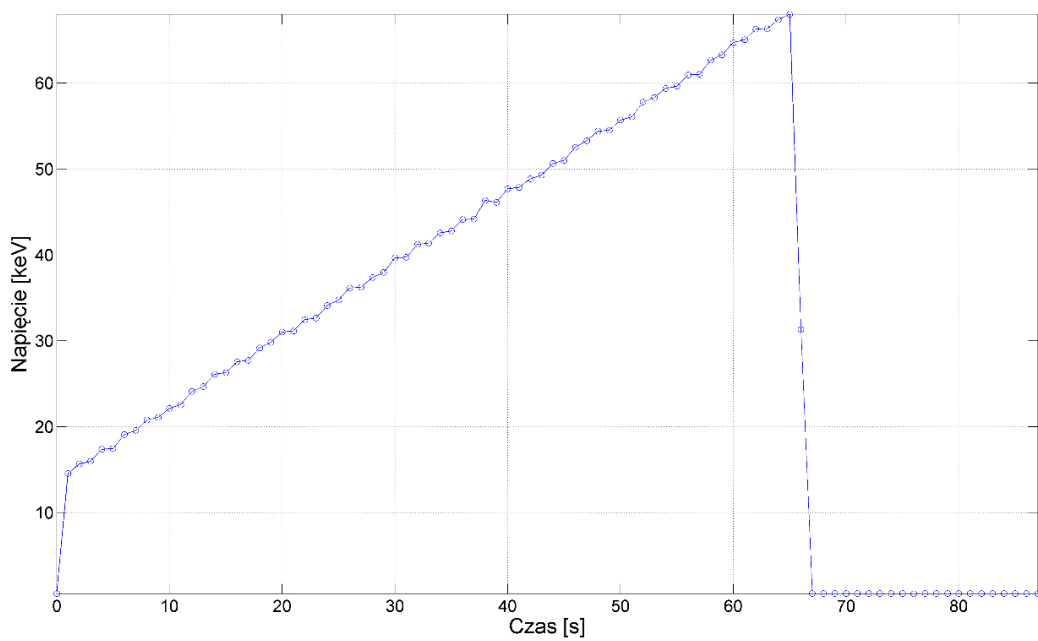
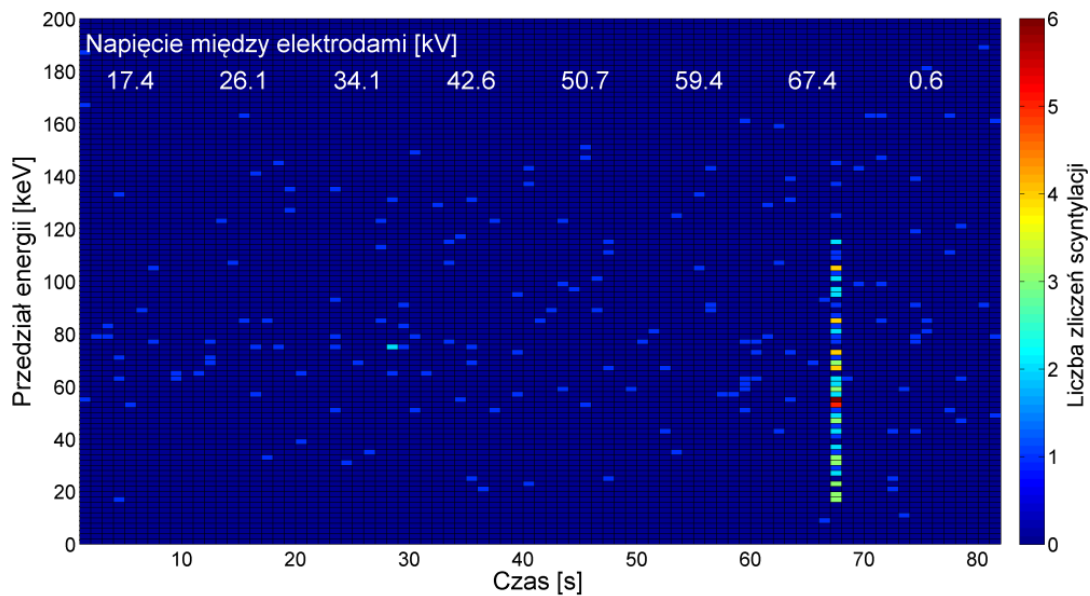
a)



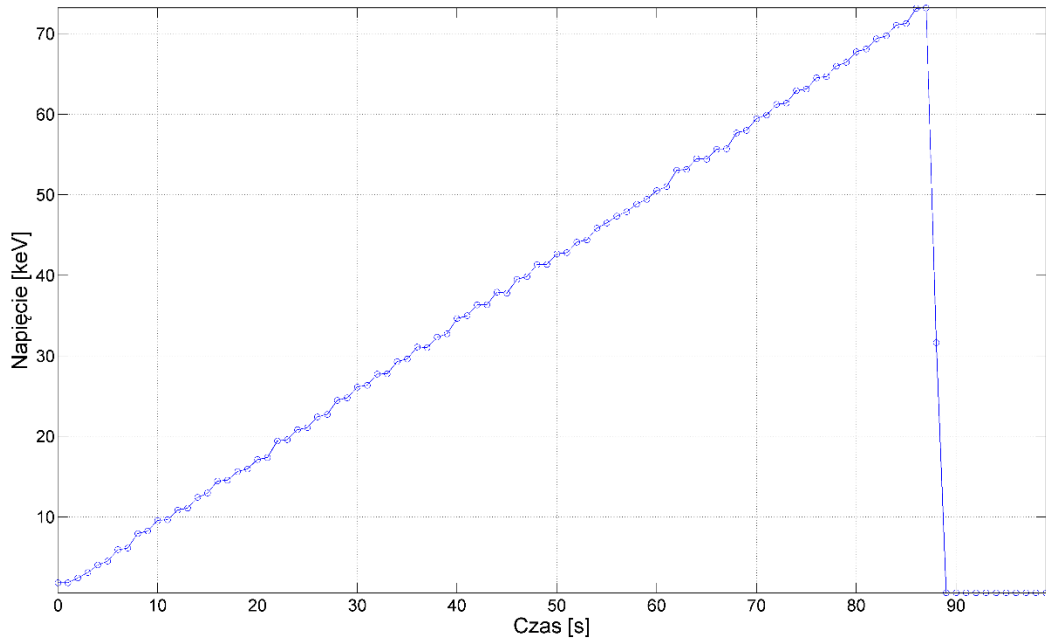
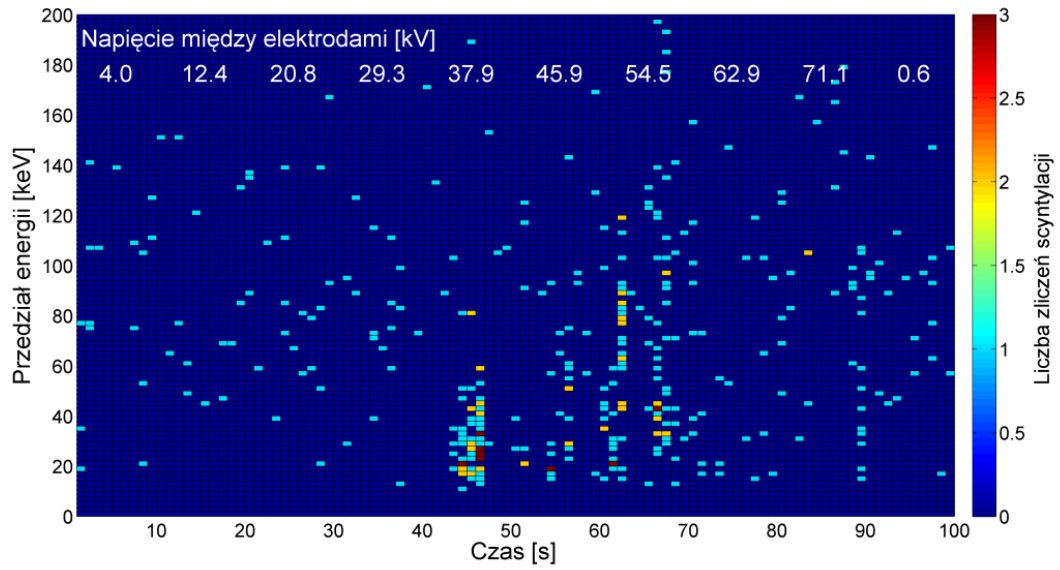
b)



c)

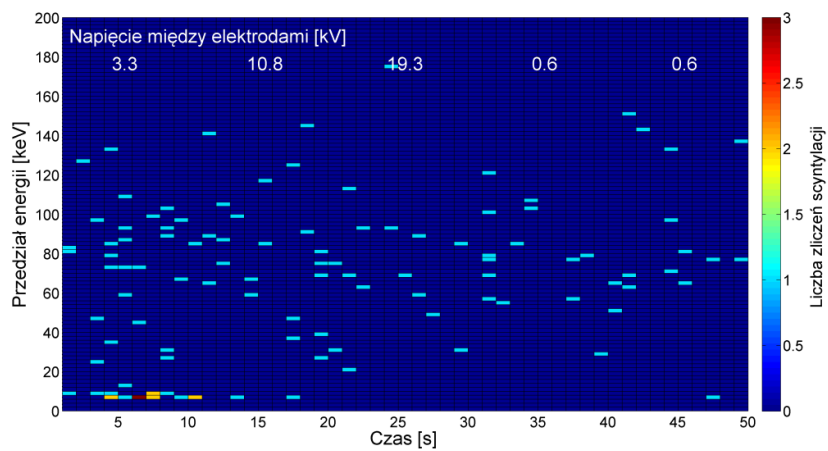


d)

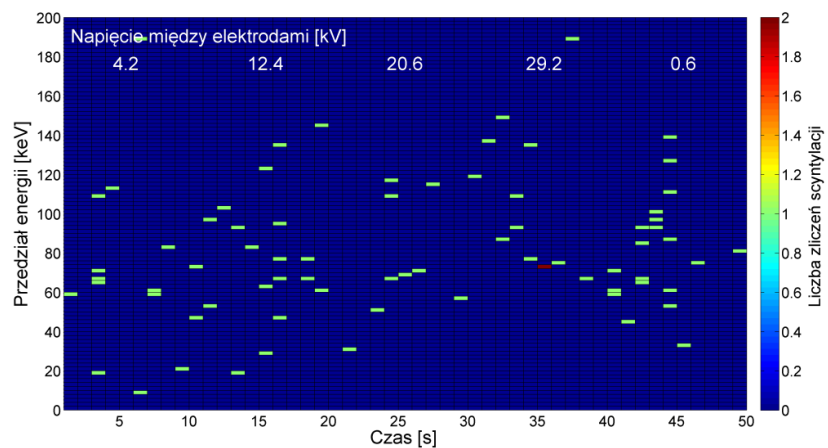


Rys. 6.5 Spektrum energetyczne WNZ w układzie Ostrze-ostrze dla odległości między elektrodami: a) 80 mm b) 160 mm c) 180 mm d) 200 mm, wraz z odpowiadającymi wykresami narastającego napięcia między elektrodami w czasie badania. Ośrodkiem, w którym zarejestrowano spektrum było powietrze o ciśnieniu atmosferycznym.

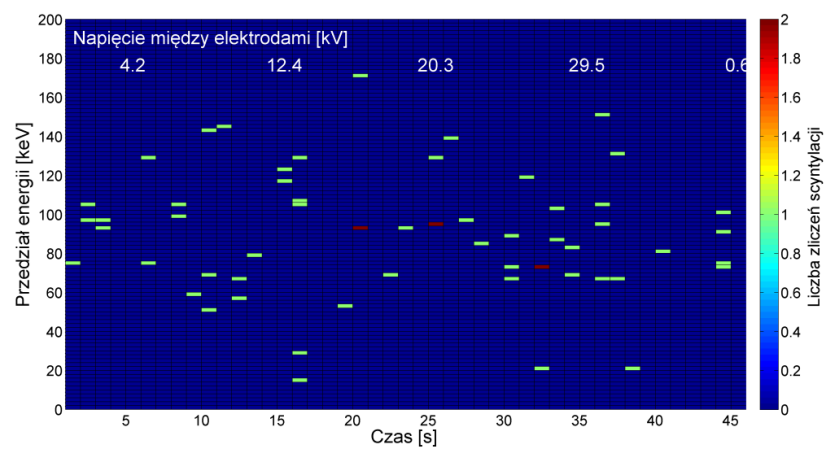
a)



b)



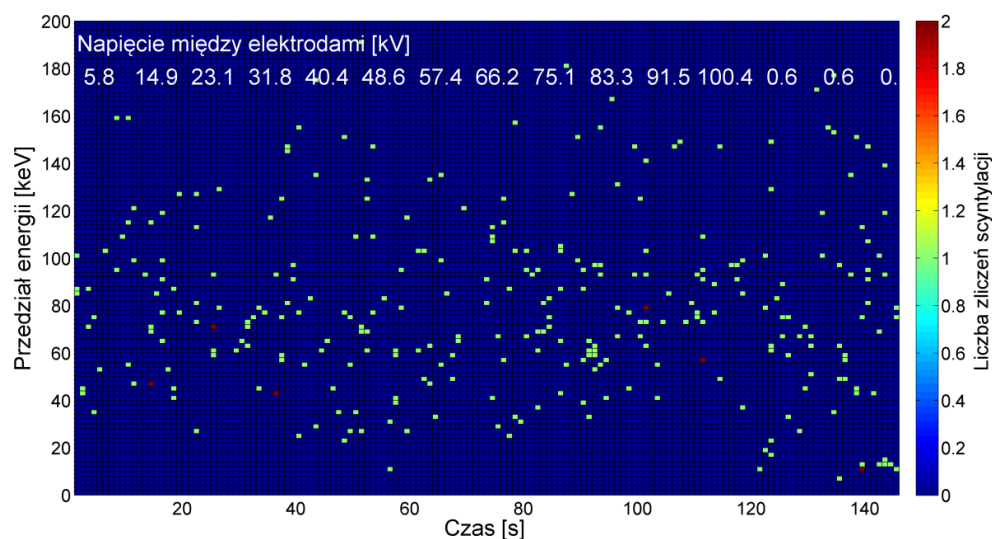
c)



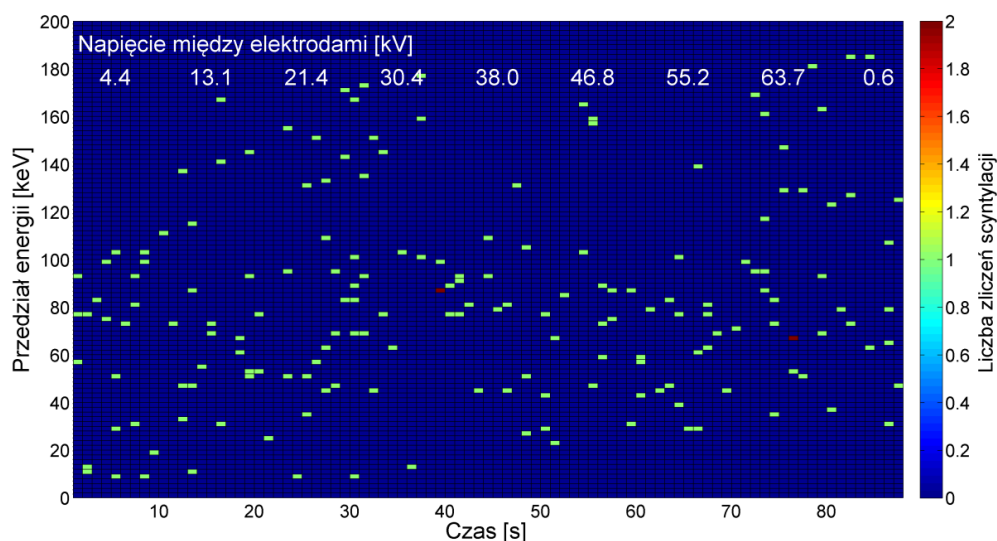
Rys. 6.6. Spektrum energetyczne WNZ ślizgowych dla odległości między elektrodami: a) 3 mm b) 33 mm c) 63 mm. Odległość detektora od źródła WNZ wynosiła 10 mm. Ośrodkiem w którym zarejestrowano spektrum było powietrze o ciśnieniu atmosferycznym.

6.3.2. Pomiary promieniowania jonizującego generowanego przez WNZ w oleju

Pomiary wykonane w oleju opierały się na badaniu WNZ generowanych przez układ iskierników ostrze-ostrze gdzie odległość między elektrodami wynosiła 28 mm. Następnie wprowadzano do układu pęcherzyki powietrza i argonu. Wybrane wyniki przedstawiono na rysunkach 6.7. i 6.8.



Rys. 6.7. Spektrum energetyczne WNZ w układzie ostrze-ostrze z wprowadzonymi pęcherzykami powietrza. Elektrody zanurzone były w oleju, detektor znajdował się nad powierzchnią oleju. Odległość między elektrodami wynosiła 28 mm



Rys. 6.8. Spektrum energetyczne WNZ w układzie ostrze-ostrze z wprowadzonymi pęcherzykami argonu. Elektrody zanurzone w oleju, detektor nad powierzchnią oleju, detektor znajdował się nad powierzchnią oleju. Odległość między elektrodami wynosiła 28 mm

6.4. Analiza wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez WNZ

Badania nad wyładowaniami niepełnymi niezależnie od ośrodka oraz od zastosowanego układu elektrod nie dało jednoznacznej odpowiedzi na pytanie czy w czasie wyładowań niepełnych generowane jest promieniowanie jonizujące. Część wyników zilustrowanych na rysunku 6.5 uzyskanych w badaniach wykonanych w powietrzu sugeruje, że być może występuje niskoenergetyczne promieniowanie hamowania na tyle jednak słabe, że zarejestrowanie go jest trudne umieszczając detektor przy elektrodzie ujemnej. Niskoenergetyczne promieniowanie jest krótko zasięgowe jednak zarejestrowane dane mogły być efektem zaburzeń pola elektromagnetycznego pozwalające na większy zasięg cząsteczek. Innym możliwym wytłumaczeniem uzyskanych wyników w układzie ostrze-ostrze w powietrzu jest przeskok iskry między elektrodami. Nie jest to całkowite przebicie układu, ale energia wyzwolona podczas przeskoku iskry mogła zjonizować cząsteczki powietrza w bliskiej odległości detektora.

7. Badania promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

7.1. Opis układu pomiarowego do badań wyładowań zupełnych w powietrzu

Układ pomiarowy składał się z zestawu iskierników zasilanego wysokim napięciem z transformatora oraz detektora scyntylacyjnego umieszczonego przy elektrodzie ujemnej lub też w pewnej odległości od tej elektrody. Detektor zamocowany na ramieniu konstrukcji ZPS3D

7.2. Sposób przeprowadzenia pomiarów promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

Również badania promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne wykonano dla dwóch ośrodków izolacyjnych. Dla powietrza pod ciśnieniem atmosferycznym oraz dla oleju mineralnego. W trakcie badania zwiększano napięcie na elektrodzie dodatniej w danym układzie aż do momentu przebicia. Detektor scyntylacyjny mierzył przez cały czas trwania badania natomiast wyniki zarejestrowane zostały w momencie przebicia.

Badania w powietrzu wykonane zostały dla 4 układów elektrod: układ ostrze-ostrze dla odległości między elektrodami od 20 mm do 200 mm zwiększanych o 20 mm dla każdej następnej serii pomiarowej, co dało 10 serii pomiarowych po 14 pomiarów; układ sfera-sfera (średnica kul 50 mm) dla odległości między elektrodami od 20 mm do 200 mm zwiększane, co 40 mm dla każdego następnego pomiaru (20 mm różnicy pomiędzy ostatnią i przedostatnią serią pomiarową), co dało 6 serii pomiarowych po 14 pomiarów; układu sfera-sfera o średnicy kul 20 mm dla odległości od 20 do 200 mm zwiększanej, co 20 mm, co dało 10 serii pomiarowych dla układu po 14 pomiarów oraz dla układu ostrze-płyta gdzie wykonano 11 serii pomiarowych. Dwie serie pomiarowe dla odległości 30 mm i 60 mm po 5 pomiarów oraz 9 serii dla odległości elektrod od 80 mm do 240 mm zwiększanej o 20 mm każda seria. Dla każdej serii pomiarowej wykonano 14 powtórzeń. Wykonano również dwie serie badań powtarzalności wyników dla układu ostrze-ostrze oraz sfera-sfera o średnicy kul 50 mm. Odległości

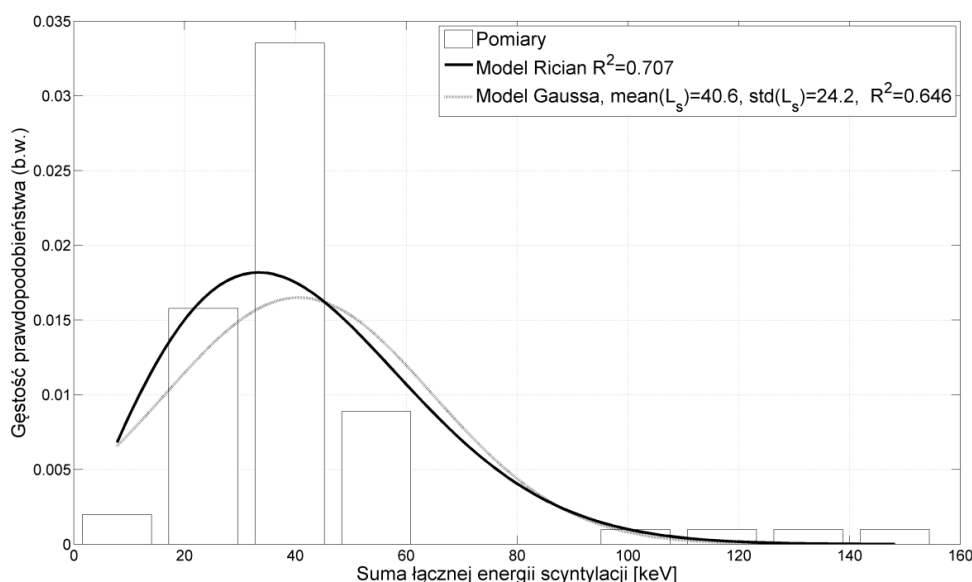
elektrod w tych badaniach były takie same i wynosiły 200 mm, a powtórzeń dla układu ostrze-ostrze i sfera-sfera było odpowiednio 132 i 100. Uzyskane wyniki przedstawiono w następnych rozdziałach.

Następnie wykonano piętnaście serii badań zależności odległości detektora od elektrody ujemnej. Odległość między elektrodami była stała i wynosiła 200 mm. Badanie wykonano dla układu ostrze-ostrze, a odległość detektora od elektrody ujemnej zmieniała się w przedziale od 10 mm do 140 mm, co 10 mm każda seria oraz od 140 mm do 220 mm, co 20 mm dla danej serii. Każda seria pomiarowa składała się z 14 powtórzeń tego samego doświadczenia.

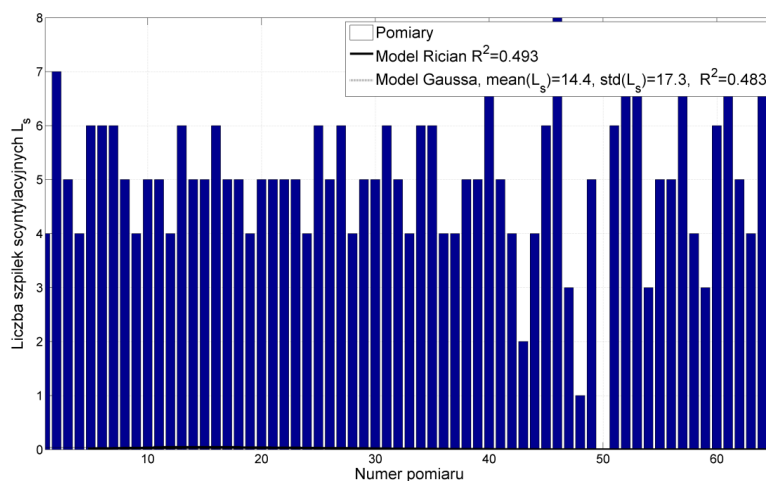
7.3. Badanie promieniowania wysokoenergetycznego w układzie ostrze-ostrze generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

7.3.1. Badanie powtarzalności wyników pomiarów promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

Wybrane i opisane poniżej przykładowe wyniki pomiarów badania promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w różnych układach iskierników odzwierciedlają przebieg całego badania. Wyniki powtarzalności pomiarów uzyskane w trakcie badań przedłożono na rysunkach 7.1 i 7.2.



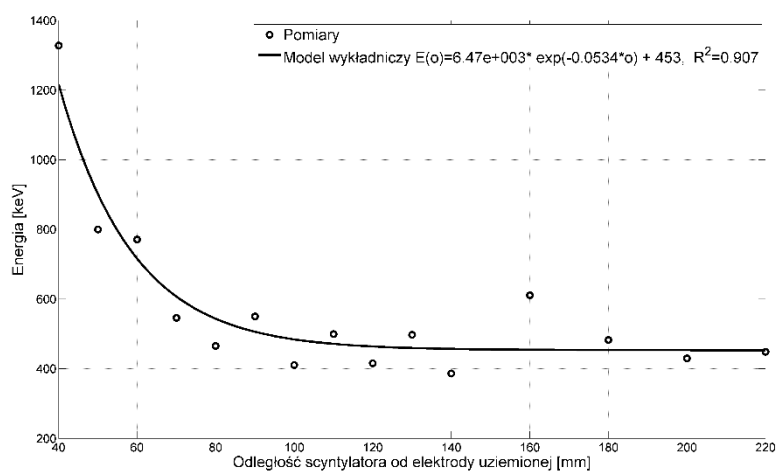
Rys. 7.1 Gęstość prawdopodobieństwa całkowitej energii pomiaru. Wynik uzyskany dla układu ostrze-ostrze. Odległość między elektrodami wynosiła 200 mm



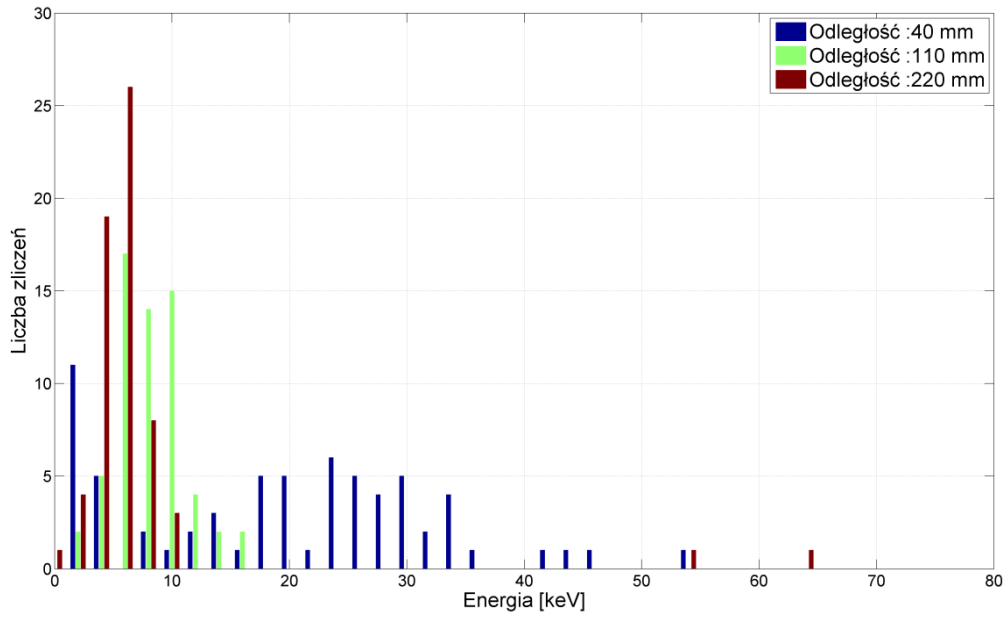
Rys. 7.2 Liczba scyntylacji dla każdego pomiaru. Wynik uzyskany dla układu ostrze-ostrze. Odległość między elektrodami wynosiła 200 mm

7.3.2. Badanie wpływu odległości scyntylatora od elektrody ujemnej na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego

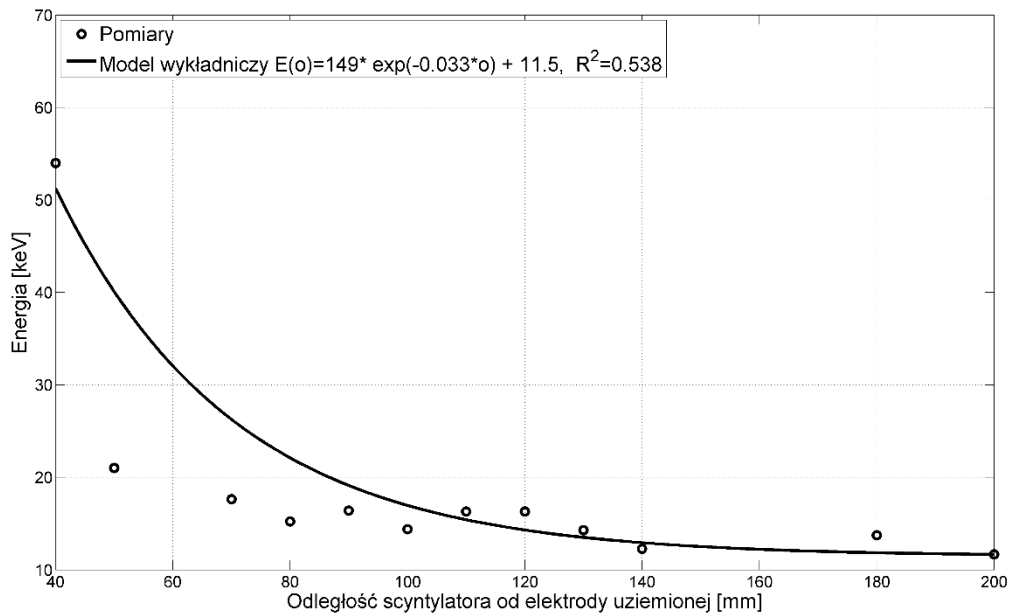
Badania zależności odległości detektora od elektrody ujemnej przeprowadzono dla dystansu między elektrodami 200 mm. Odległość detektora zmieniała się od 40 mm do 220 mm, co dało 15 serii pomiarowych. Uzyskane wyniki zademonstrowano na rysunkach 7.3 dla sumy energii scyntylacji, 7.4 przedstawiający widmo energetyczne zjawiska dla wybranych odległości i 7.5 ilustrujący średnią energię rejestrowaną w zależności od odległości detektora od elektrody ujemnej.



Rys. 7.3 Suma energii scyntylacji w zależności od odległości detektora od elektrody ujemnej. Układ ostrze-ostrze w powietrzu. Odległość między elektrodami 200 mm



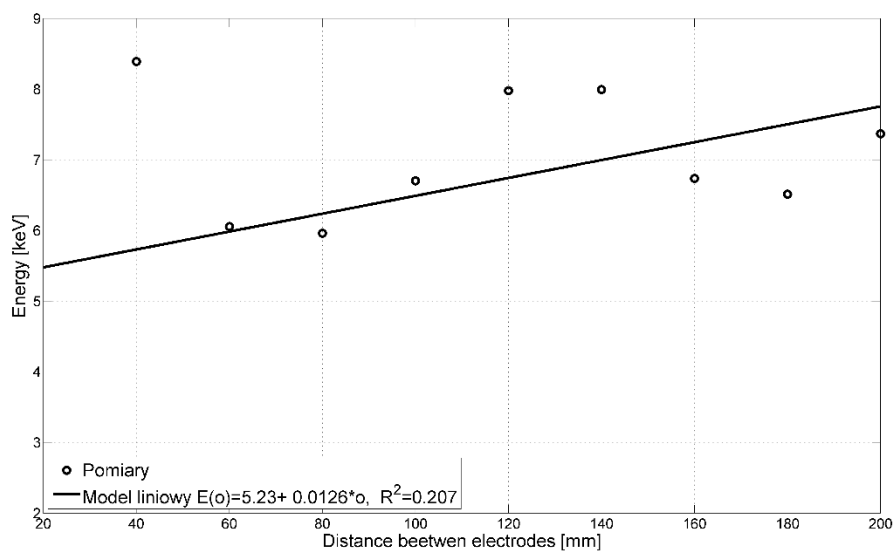
Rys. 7.4 Widmo energetyczne dla wybranych odległości detektora. Układ ostrze-ostrze w powietrzu. Odległość między elektrodami 200 mm



Rys. 7.5 Średnia energia scyntylacji w zależności od odległości detektora od elektrody ujemnej. Układ ostrze-ostrze w powietrzu. Odległość między elektrodami 200 mm

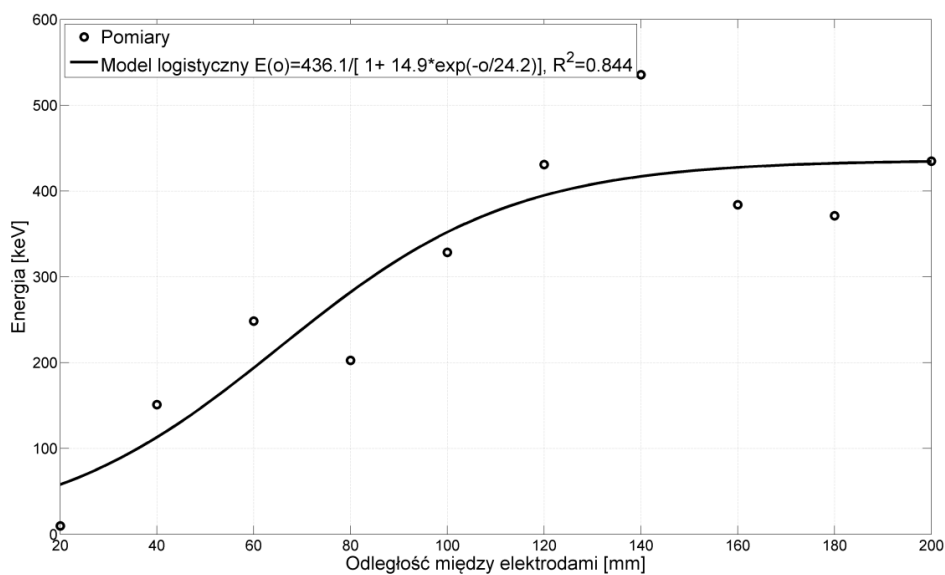
7.3.3. Badanie wpływu odległości między elektrodami na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego

Badanie wpływu odległości między iskiernikami na rejestrowaną liczbę scyntytacji i ich energię przeprowadzono dla 10 różnych wartości odległości. Na rysunku 7.6 i 7.7 opisano odpowiednio średnią energię scyntytacji oraz sumę rejestrowanej energii scyntytacji w zależności od odległości między elektrodami.



Rys. 7.6 Zależność średniej energii scyntytacji od odległości między elektrodami.

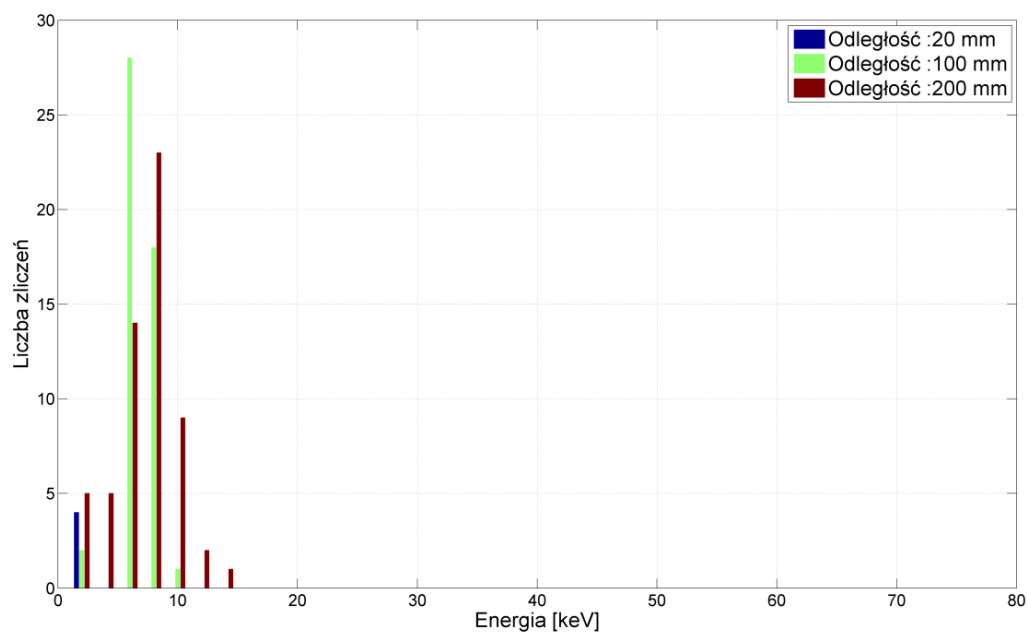
Badanie w powietrzu w układzie ostrze-ostrze



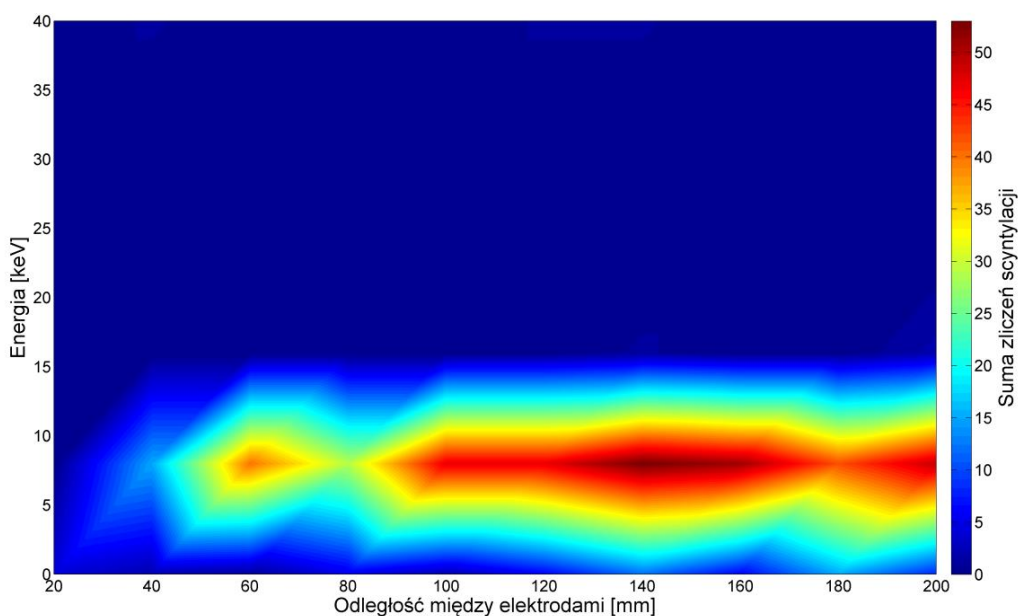
Rys. 7.7 Suma energii scyntytacji w zależności od odległości między elektrodami.

Badanie w powietrzu w układzie ostrze-ostrze

Rysunek 7.8 przedstawia widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami, natomiast rysunek 7.9 obrazuje spektrum energetyczne zarejestrowane w tym układzie elektrod.

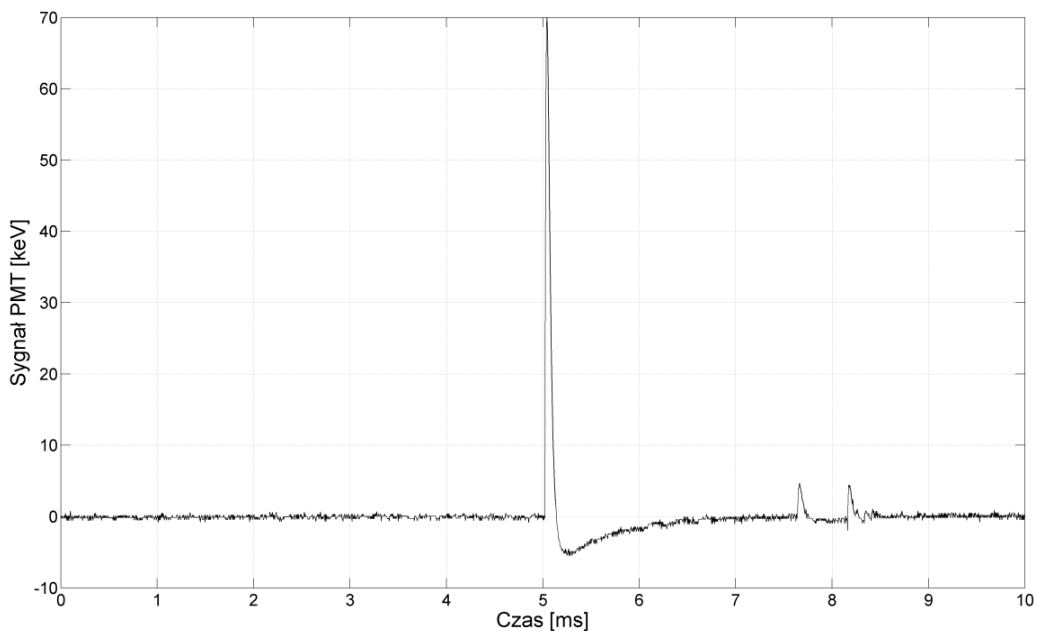


Rys. 7.8 Widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami. Badanie w powietrzu w układzie ostrze-ostrze

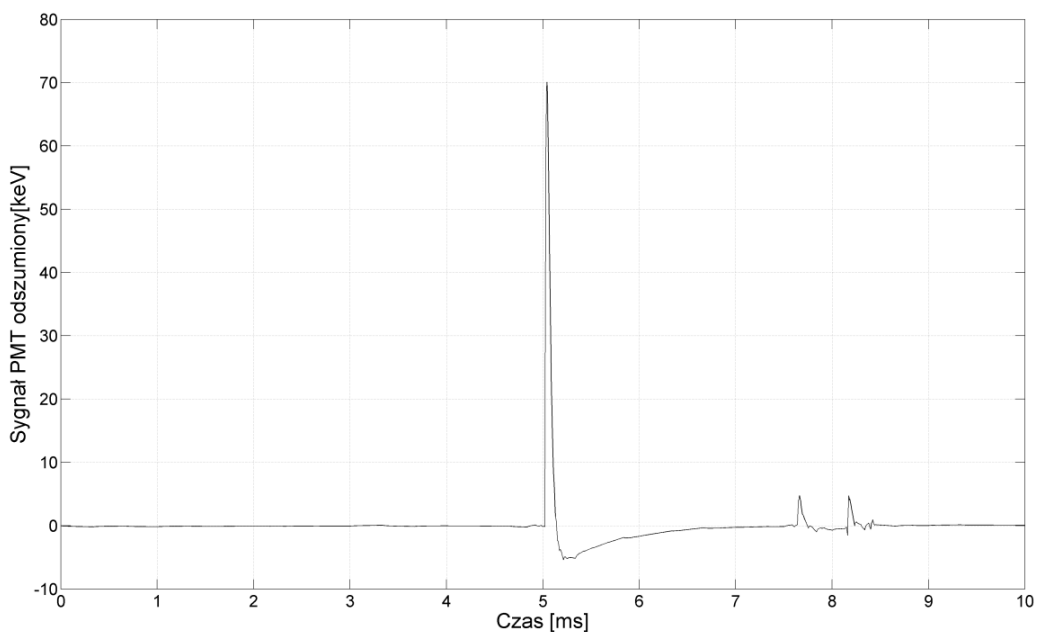


Rys. 7.9 Spektrum energii scyntylacji zarejestrowane w układzie ostrze-ostrze w powietrzu

Przykładowe dane cząstkowe zarejestrowane w badaniu są zademonstrowane na rysunku 7.10 i 7.11 Opisują odpowiednio zarejestrowany pik scyntylacyjny oraz sygnał po usunięciu szumów i zakłóceń.

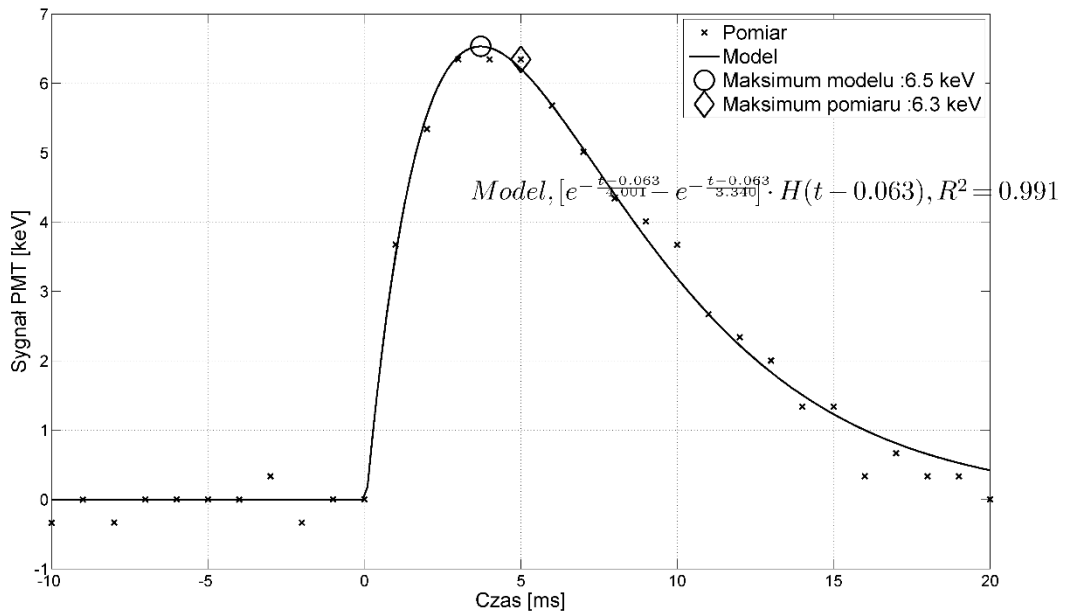


Rys. 7.10 Przykładowa scyntylacja zarejestrowana dla układu. Odległość między elektrodami 40 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 1 mm

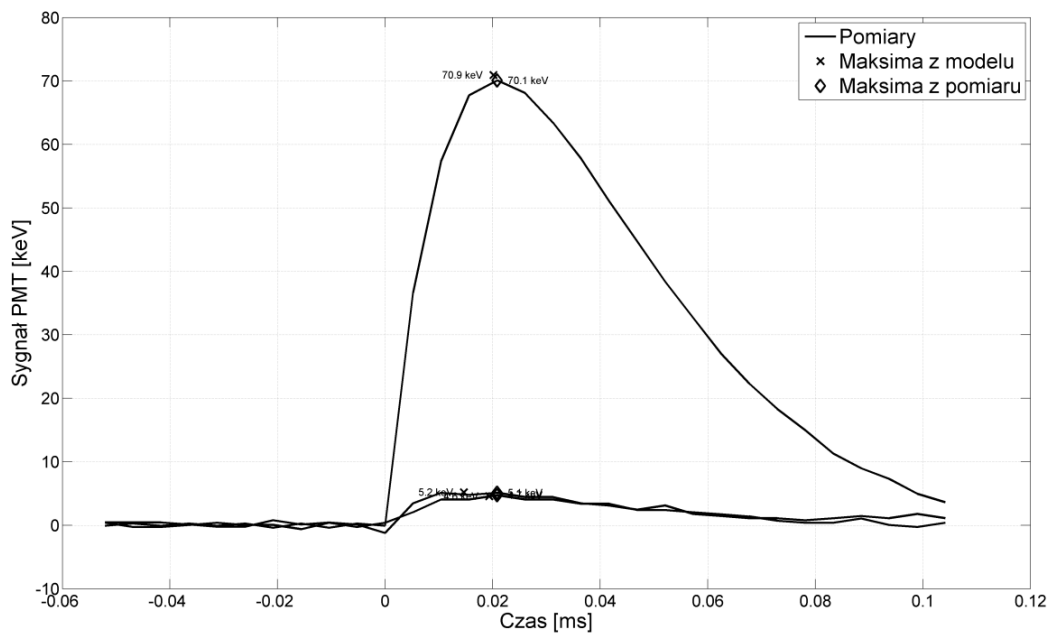


Rys. 7.11 Przykładowa scyntylacja z rysunku 7.10 po usunięciu szumów i zakłóceń

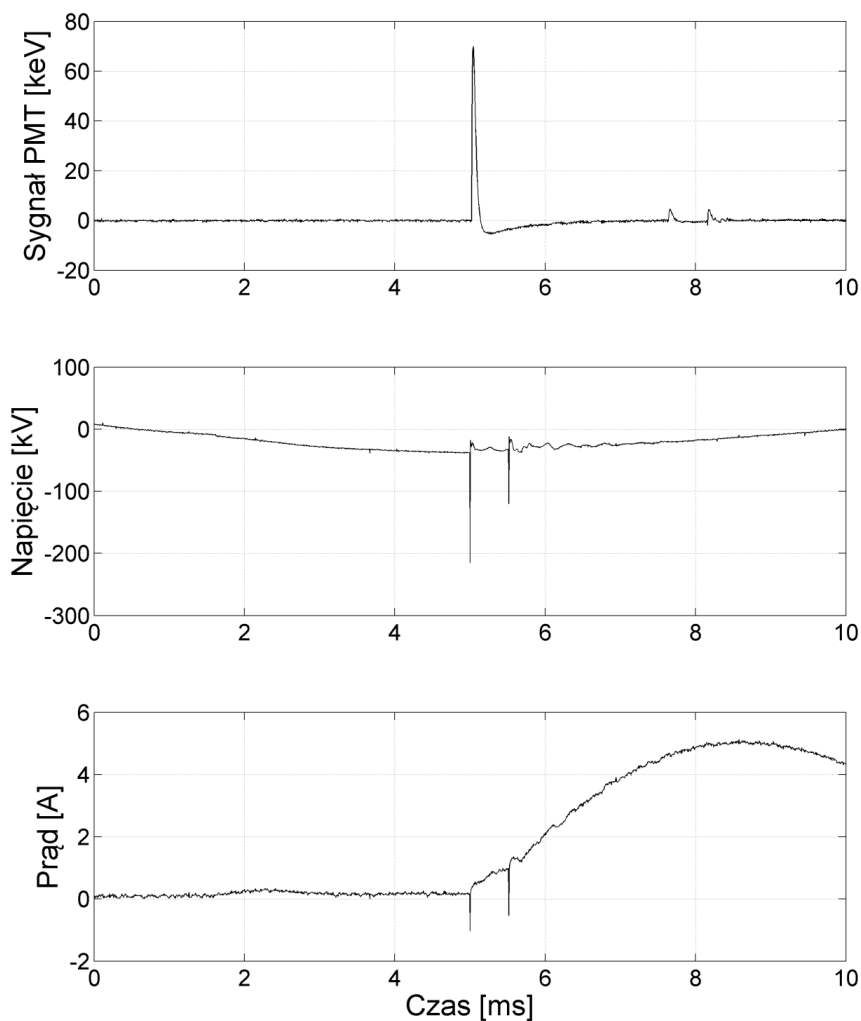
Na rysunku 7.12 i 7.13 przedstawiono przykładowe modele scyntyacji dla układu ostrze-ostrze w powietrzu. Rysunek 7.14 ukazuje przebiegi czasowe sygnałów z zsynchronizowanych układów pomiarowych napięcia i natężenia prądu oraz układu pomiarowego promieniowania jonizującego.



Rys. 7.12 Najlepiej dopasowany model przykładowej scyntyacji w powietrzu w układzie ostrze-ostrze



Rys. 7.13 Różne modele matematyczne przykładowej scyntyacji w układzie ostrze-ostrze w powietrzu



Rys. 7.14 Przebiegi czasowe sygnałów z fotopowielacza oraz prądowego i napięciowego na uzwojeniu pierwotnym transformatora w momencie przebicia

7.3.4. Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu w układzie ostrze-ostrze

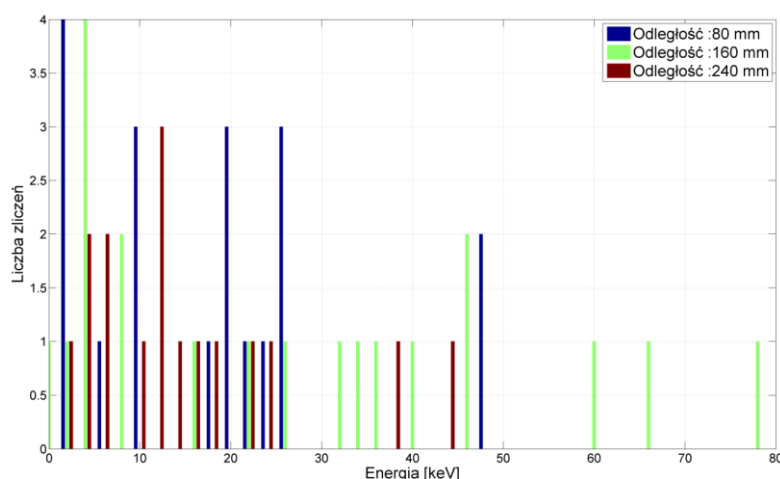
W układzie ostrze-ostrze można zauważyć wzrost rejestrowanej energii wraz ze wzrostem odległości pomiędzy elektrodami. Zarejestrowane widmo energetyczne również przesuwają się w kierunku wyższych energii wraz ze wzrostem odległości między elektrodami. Przedstawione powyżej na rys. 7.9 spektrum energetyczne wskazuje wzrost liczby scyntytacji dla odległości między iskiernikami od 100 mm wzwyż. Badanie powtarzalności wyników potwierdza statystyczność zjawiska, jakim jest promieniowanie. Zarejestrowane 132 próbki wykazały podobne ilości rejestrowanych scyntytacji dla każdego pomiaru. Rozkład sumy energii w pomiarze jest w przybliżeniu rozkładem

Gaussa. Przeprowadzone badanie zależności odległości detektora od elektrody ujemnej wykazało zmniejszenie się sumy energii rejestrowanej wraz ze zwiększaniem odległości detektora. Cząsteczki wzbudzone podczas wyładowania zupełnego znajdowały się coraz dalej od detektora, a więc emitowane kwanty energii w czasie ich powrotu do stanu podstawowego miały dłuższą drogę do pokonania. Kwanty o mniejszej energii najprawdopodobniej zgodnie z wiedzą o zasięgu promieniowania nie dochodziły do coraz bardziej oddalonego detektora. Wyznaczona średnia energia na scyntylację z zarejestrowanych danych również wskazuje na taką zależność. Widmo energetyczne zobrazowane na rysunku również sugeruje, że wraz ze wzrostem odległości detektora od źródła wyładowań rejestrowane są tylko te scyntylacje, które miały na początku dużą energię kwantu, a w czasie drogi w kierunku detektora tak jak reszta kwantów pochodzących z danego pomiaru wytracały ją w trakcie zderzeń z cząsteczkami otoczenia.

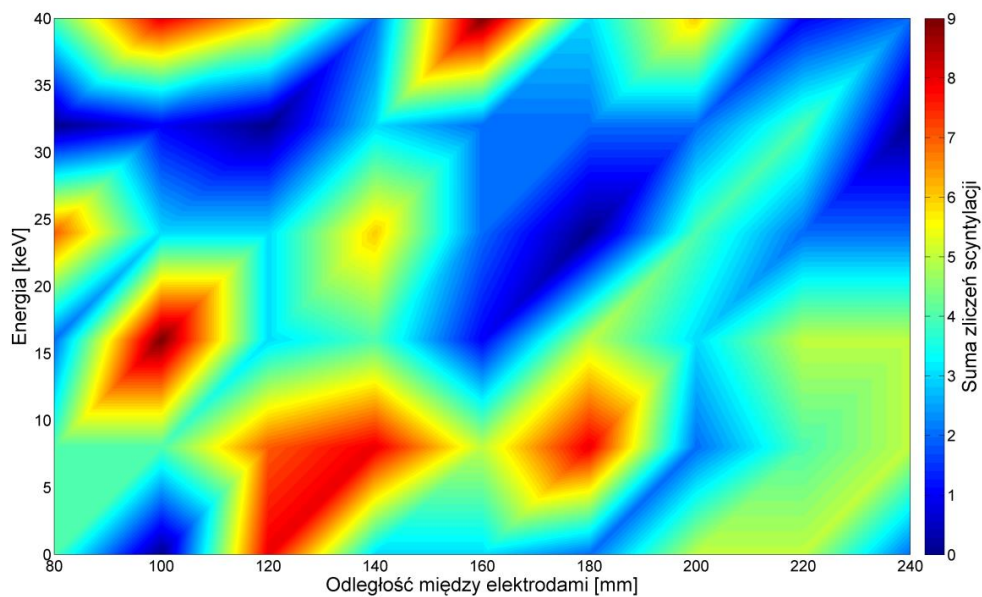
7.4. Badanie promieniowania wysokoenergetycznego w układzie ostrze- płyta generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

7.4.1. Badanie wpływu odległości między elektrodami na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego

Rysunek 7.15 ilustruje widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami, natomiast rysunek 7.16 obrazuje spektrum energetyczne zarejestrowane w tym układzie elektrod.

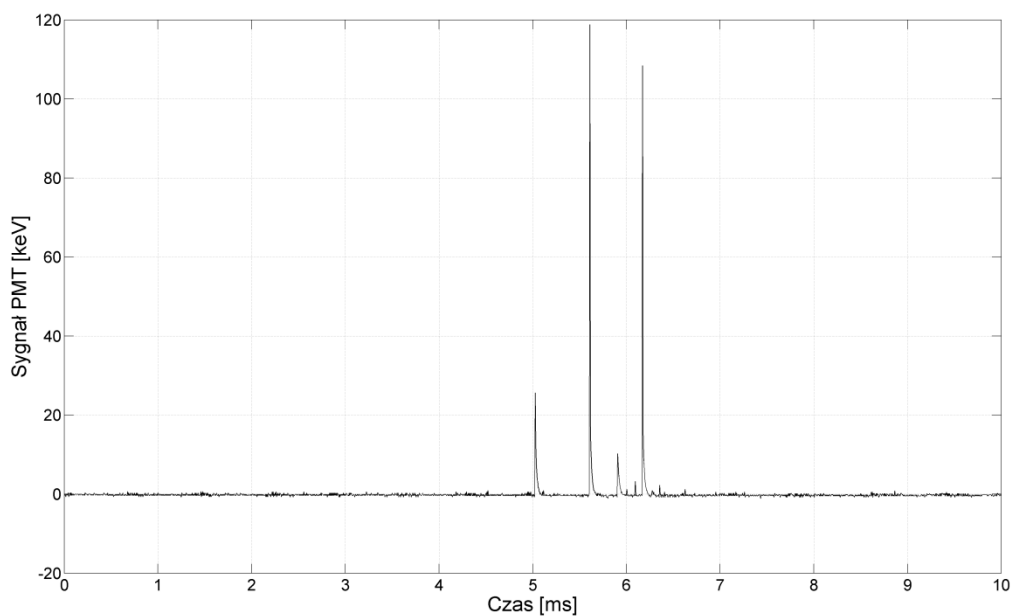


Rys. 7.15 Widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami. Badanie w powietrzu w układzie ostrze-płyta

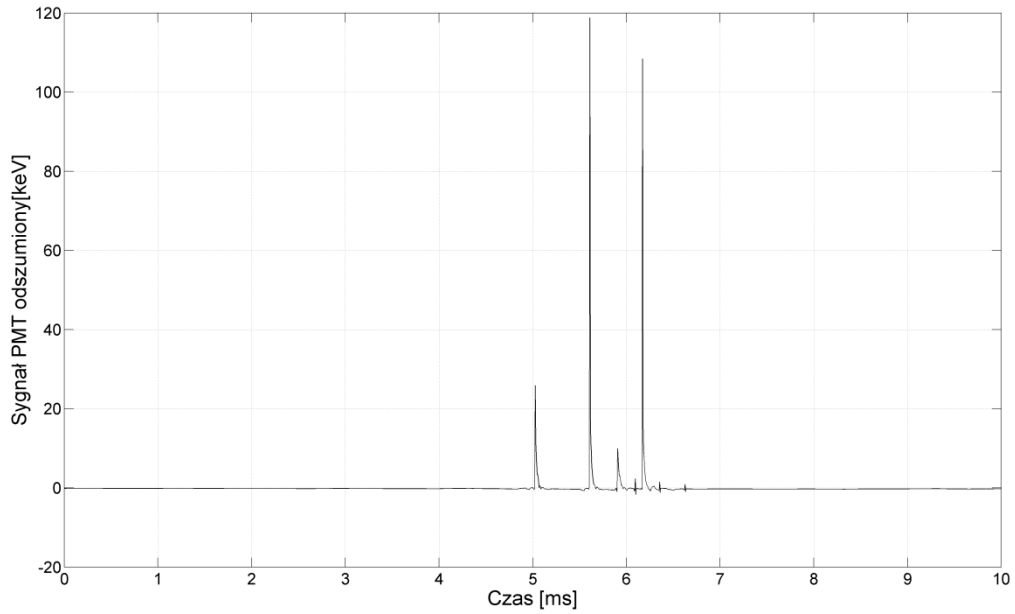


Rys. 7.16 Spektrum energii scyntylacji zarejestrowane w układzie ostrze- płyta w powietrzu

Przykładowe dane cząstkowe zarejestrowane w badaniu są przedstawione na rysunku 7.17 i 7.18. Uwidaczniają odpowiednio zarejestrowany pik scyntylacyjny oraz sygnał po usunięciu szumów i zakłóceń.

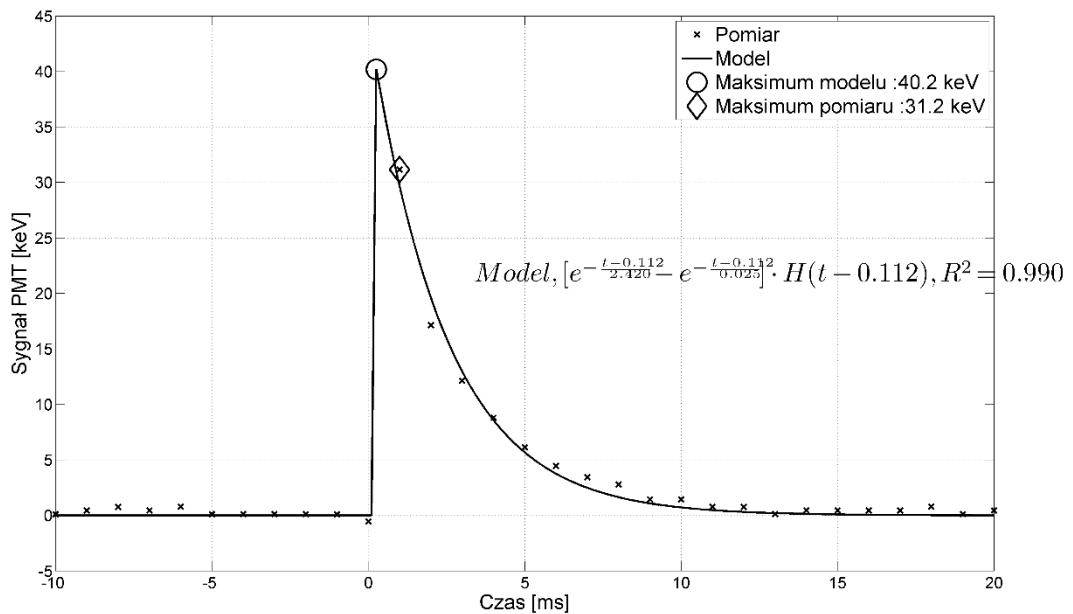


Rys. 7.17 Przykładowa scyntylacja zarejestrowana dla układu. Odległość między elektrodami 80 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 1 mm

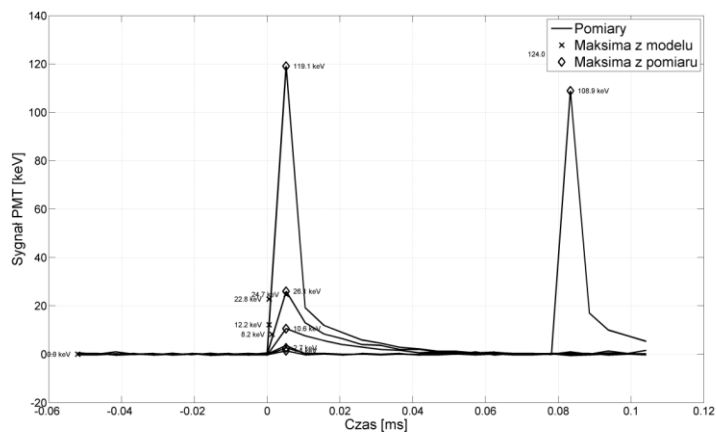


Rys. 7.18 Przykładowa scyntylacja z rysunku 7.17. po usunięciu szumów i zakłóceń

Na rysunku 7.19 i 7.20 przedstawiono przykładowe modele scyntylacji dla układu ostrze- płyta w powietrzu.

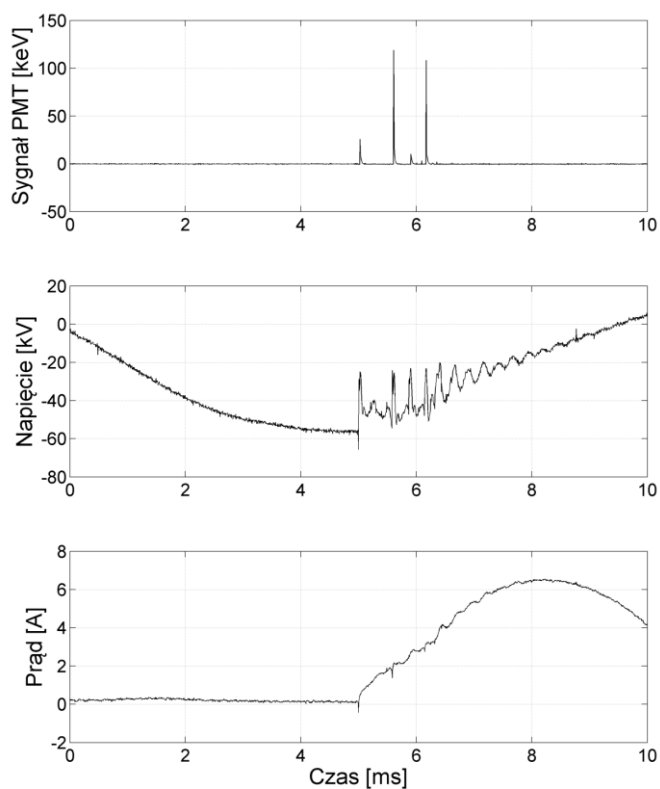


Rys. 7.19 Najlepiej dopasowany model przykładowej scyntylacji w powietrzu w układzie ostrze- płyta



Rys. 7.20 Różne modele matematyczne przykładowej scyntylacji w układzie ostrze-płyta w powietrzu

Rysunek 7.21 prezentuje przebiegi czasowe sygnałów z zsynchronizowanych układów pomiarowych napięcia i natężenia prądu oraz układu pomiarowego promieniowania jonizującego.



Rys. 7.21 Przebiegi czasowe sygnałów z fotopowielacza oraz prądowego i napięciowego na uzwojeniu pierwotnym transformatora w momencie przebiccia w układzie ostrze-płyta

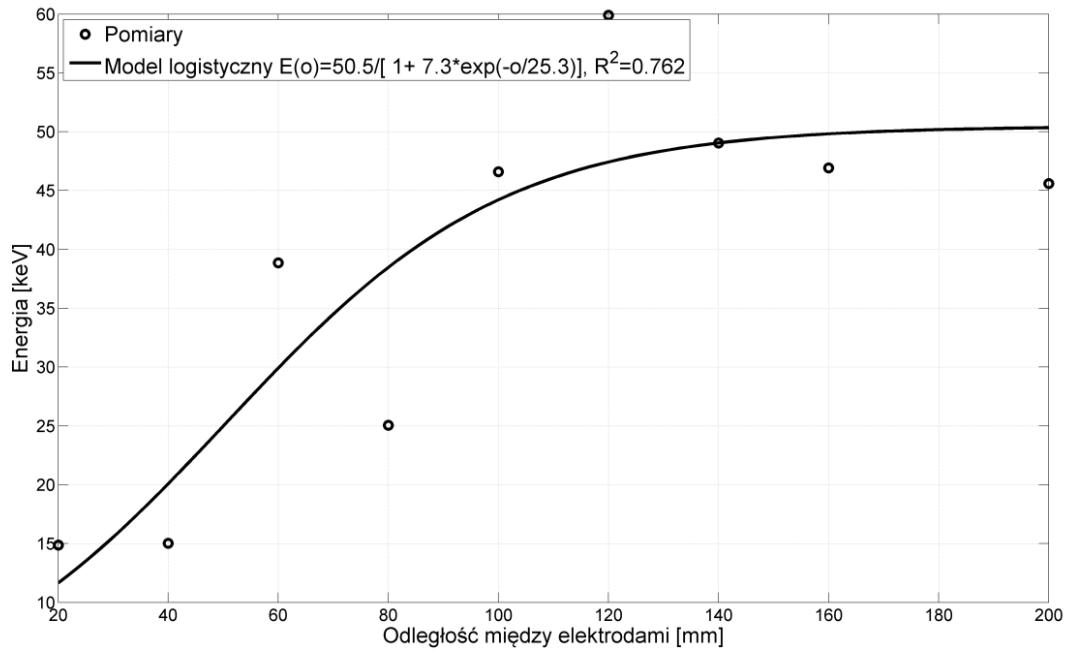
7.4.2. Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu w układzie ostrze-płyta

Badanie w układzie ostrze-płyta dało wyniki odbiegające od wcześniej uzyskanych rezultatów dla innych układów elektrod. Spektrum energetyczne nie jest jednoznaczne, co może być związane z tym, iż na elektrodzie na potencjale niższym, którą była płyta statystycznie nie można określić, w którym miejscu nastąpi wyładowanie. Rozkład pola na takiej elektrodzie jest nierównomierny, a więc położenie detektora promieniowania przy każdej akcji jonizacji będzie inne dla danego układu inercyjnego, jakim jest miejsce zjawiska jonizacji i współrzędne położenie detektora. Uzyskane wyniki sugerują występowanie promieniowania wysokoenergetycznego, ale nie da się określić jego dokładniejszej charakterystyki jak w przypadku innych badanych układów elektrod. Zarejestrowane widmo promieniowania również nie daje jednoznacznych wyników, aby móc określić zależność energii i ilości aktów jonizacyjnych od odległości między elektrodami. Natomiast pokazane w pracy przykładowe zarejestrowane szpilki jonizacyjne wskazują na sporą ilość aktów jonizacyjnych.

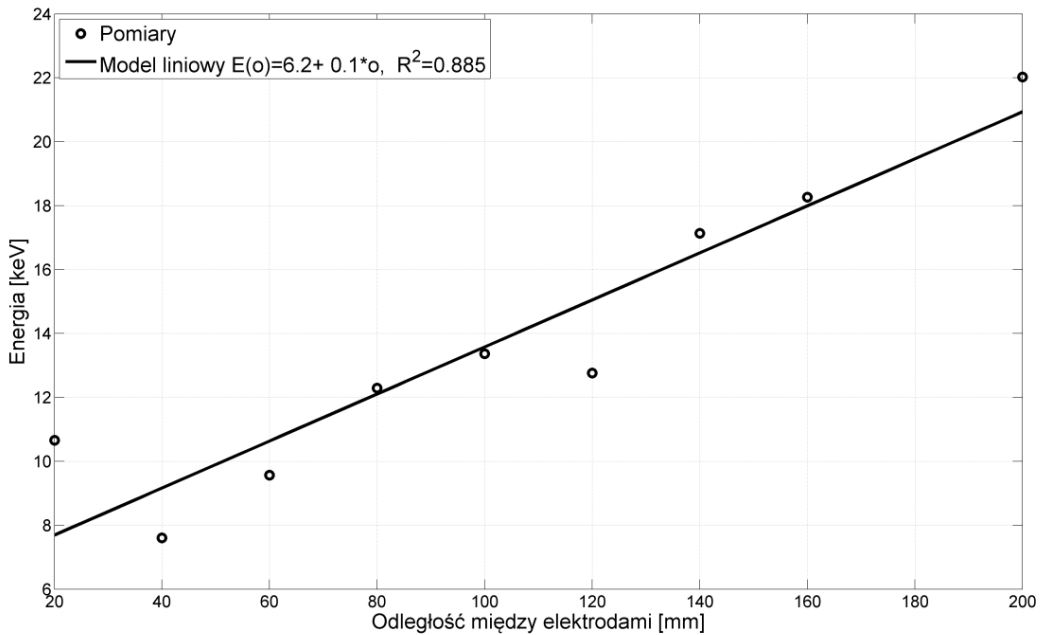
7.5. Badanie promieniowania wysokoenergetycznego w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20mm, generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

7.5.1. Badanie wpływu odległości między elektrodami na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

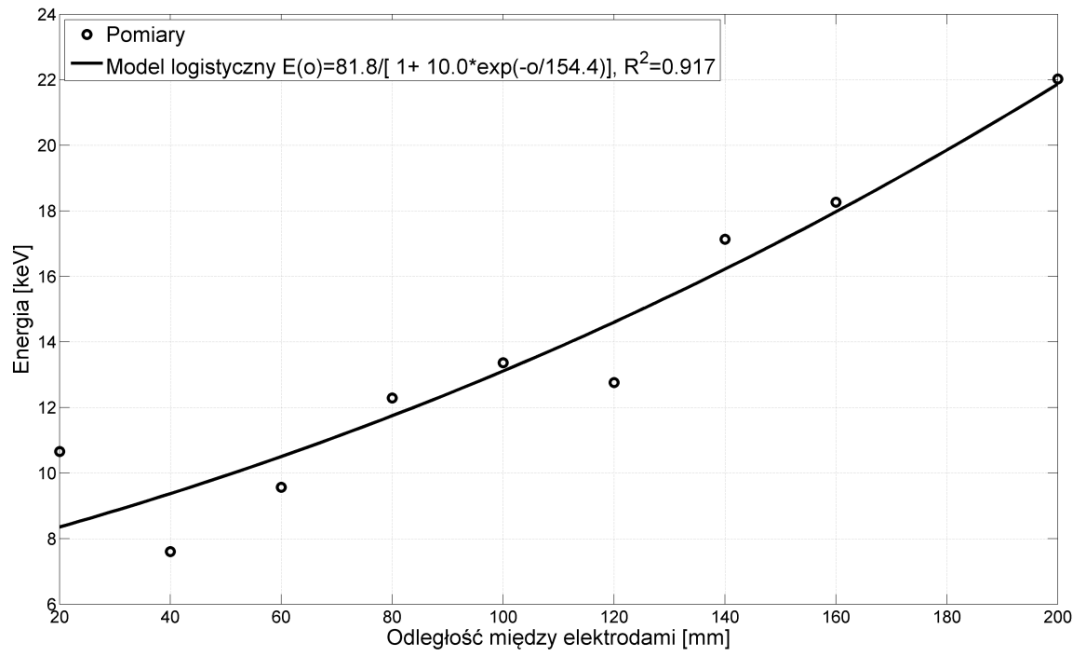
Badania w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm przeprowadzono dla 10 różnych odległości między elektrodami. Na rysunku 7.20 scharakteryzowano zależność maksymalnej energii rejestrowanej od dystansu pomiędzy iskiernikami. Rysunki 7.23, 7.24, 7.25 wyrażają natomiast średnią energię scyntylacji w tym układzie. Każdy wykres przedstawia różne modele spełniające dopasowanie.



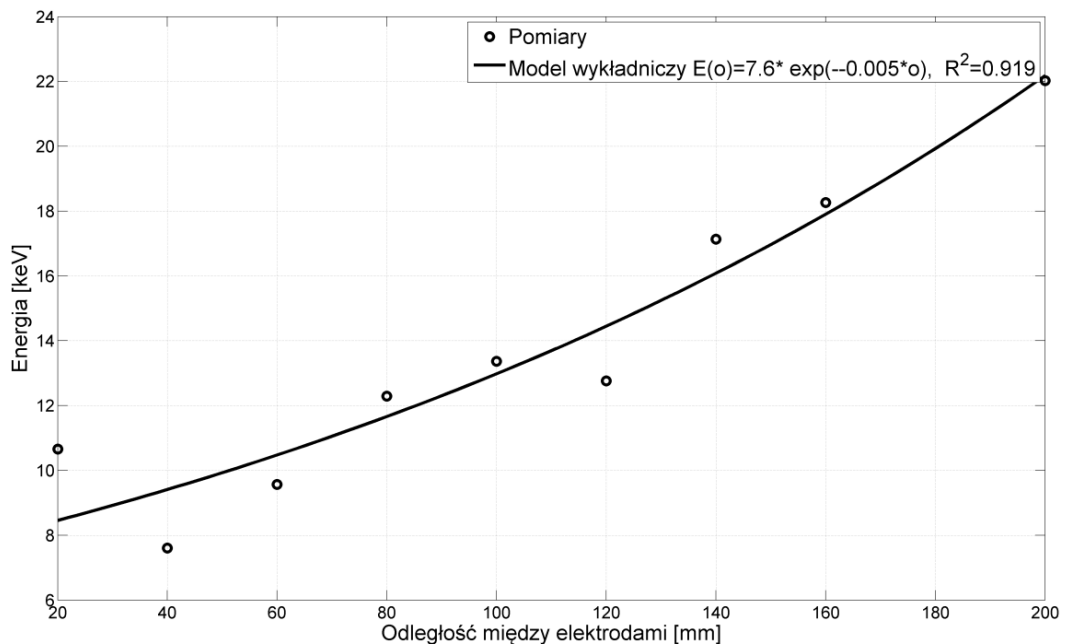
Rys. 7.22 Zależność maksymalnej energii scyntylacji od odległości między elektrodami w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu



Rys. 7.23 Zależność średniej energii scyntylacji w zależności od odległości między elektrodami w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu

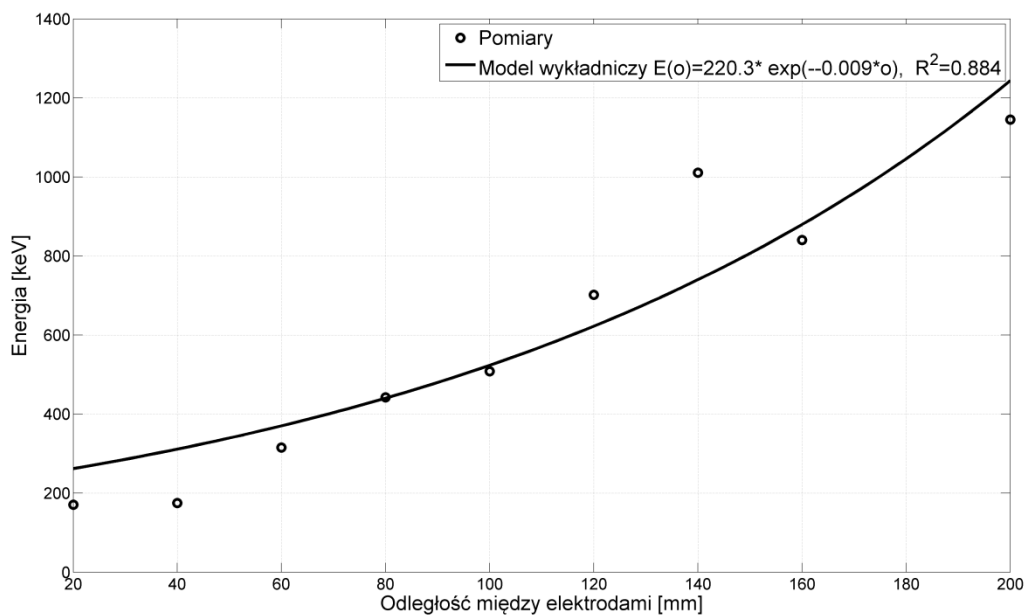


Rys. 7.24 Zależność średniej energii scyntylacji w zależności od odległości między elektrodami w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu

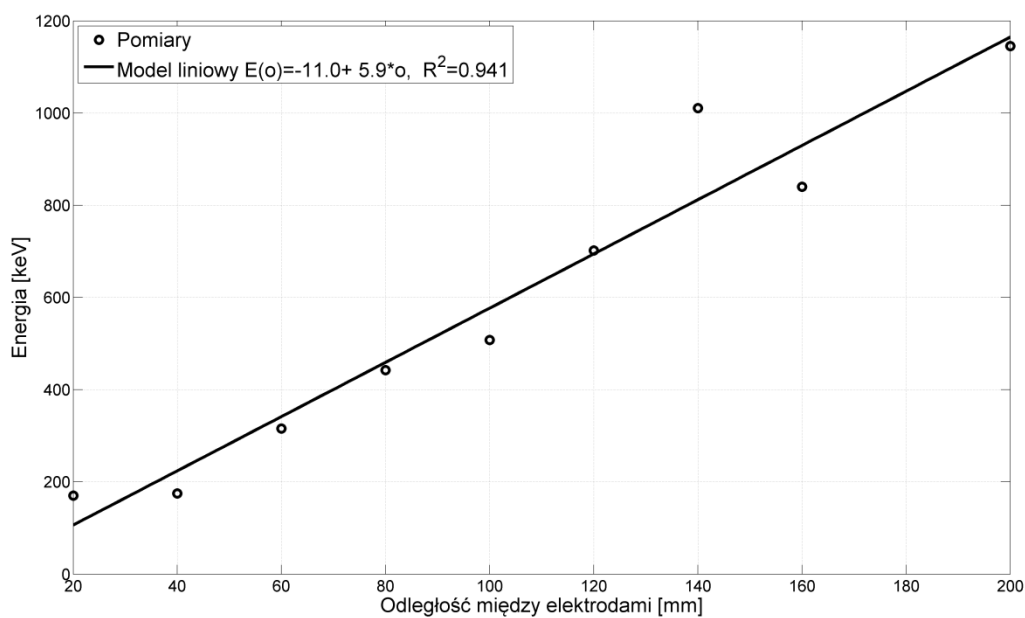


Rys. 7.25 Zależność średniej energii scyntylacji w zależności od odległości między elektrodami w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu

Rysunki 7.26, 7.27, ilustrują sumaryczną energię scyntylacji w tym układzie. Każdy wykres odzwierciedla różne modele spełniające dopasowanie.

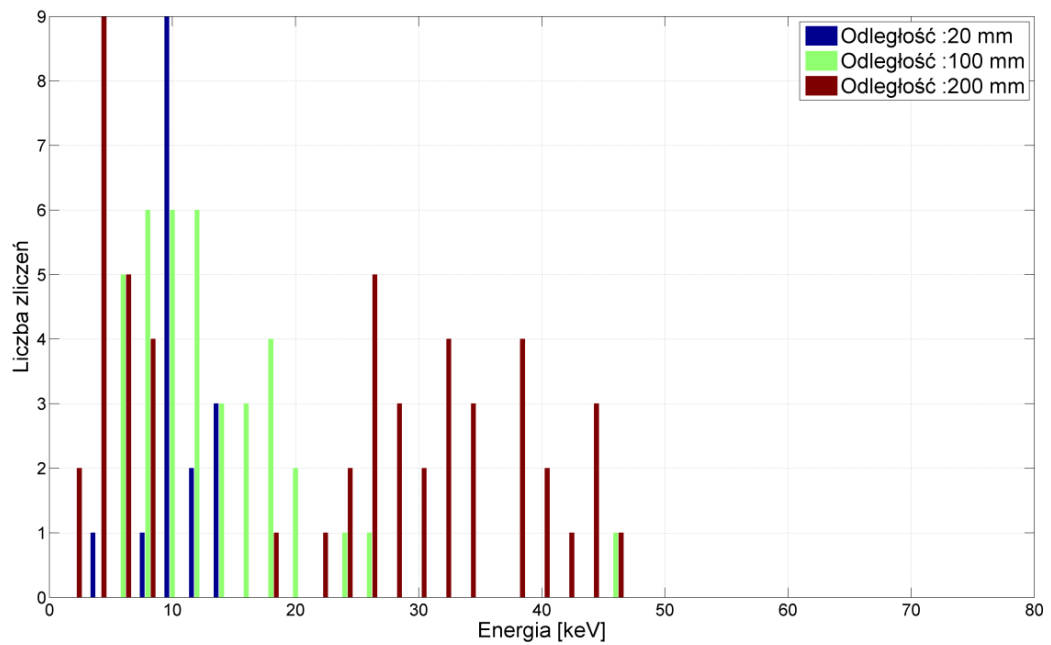


Rys. 7.26 Suma energii scyntylacji w zależności od odległości między elektrodami w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu

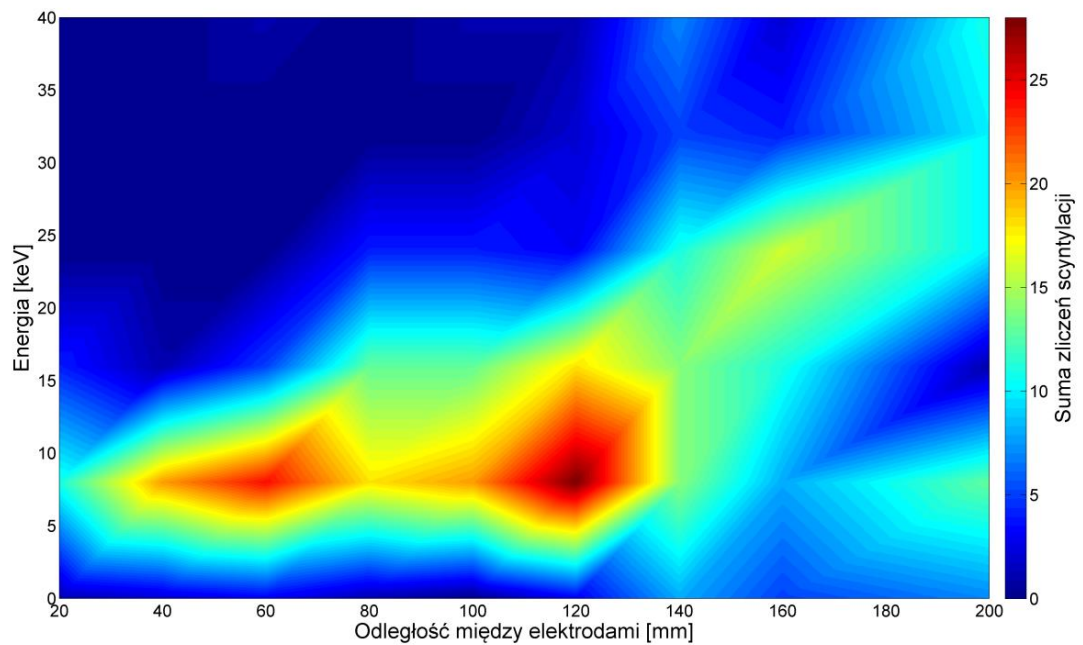


Rys. 7.27 Suma energii scyntylacji w zależności od odległości między elektrodami w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu

Rysunek 7.28 przedstawia widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami, natomiast rysunek 7.29 ukazuje spektrum energetyczne zarejestrowane w tym układzie elektrod.

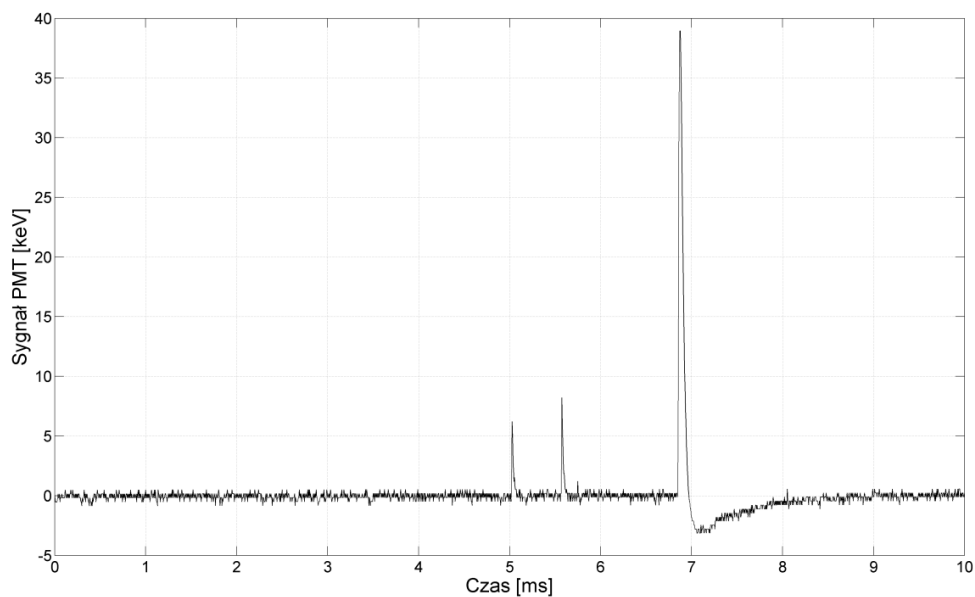


Rys. 7.28 Widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu

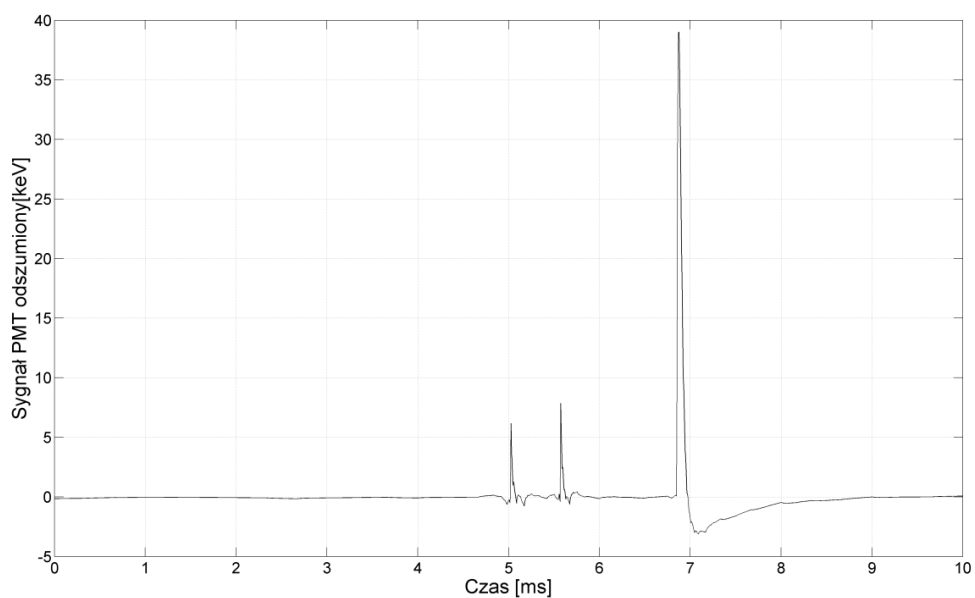


Rys. 7.29 Spektrum energii scyntylacji w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu

Przykładowe dane cząstkowe zarejestrowane w badaniu są przedstawione na rysunku 7.30 i 7.31. Odzwierciedlają odpowiednio zarejestrowany pik scyntylicyjny oraz sygnał po usunięciu szumów i zakłóceń.

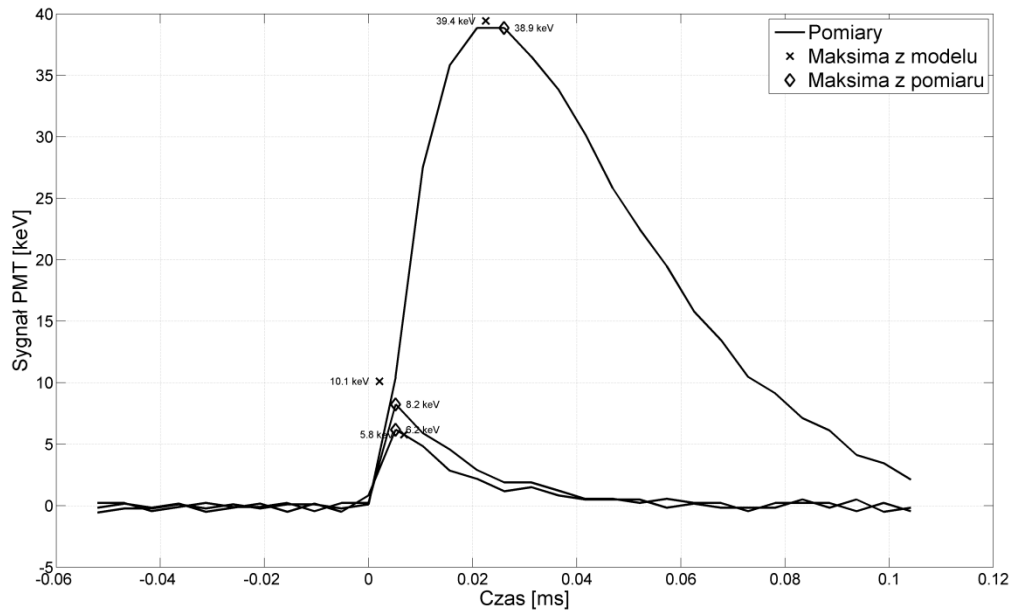


Rys. 7.30 Przykładowa scyntylicja zarejestrowana dla układu. Odległość między elektrodami 60 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 1 mm

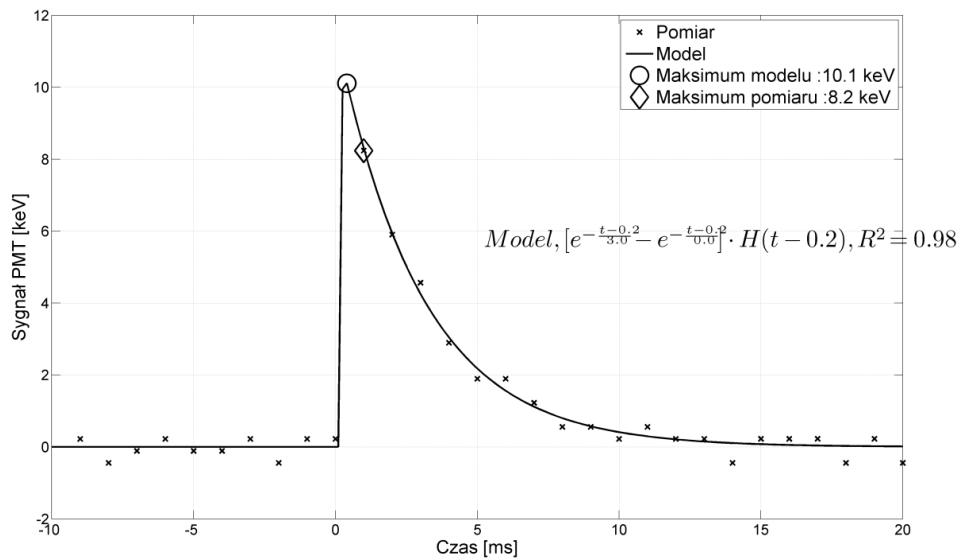


Rys. 7.31 Przykładowa scyntylicja z rysunku 7.30 po usunięciu szumów i zakłóceń

Na rysunku 7.32 i 7.33 przedstawiono przykładowe modele scyntyacji dla układu sfera-sfera o ϕ 20 mm w powietrzu.

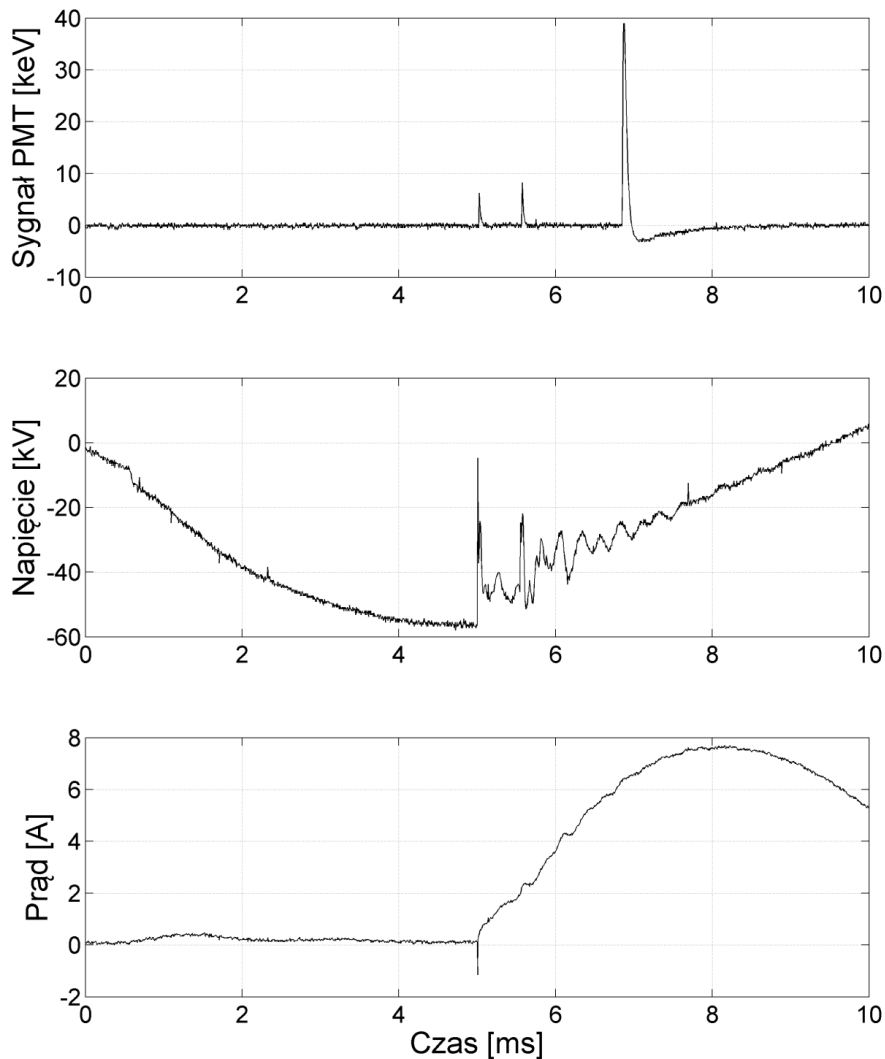


Rys. 7.32 Różne modele matematyczne przykładowej scyntyacji w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu



Rys. 7.33 Najlepiej dopasowany model przykładowej scyntyacji w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu

Rysunek 7.34 obrazuje przebiegi czasowe sygnałów z zsynchronizowanych układów pomiarowych napięcia i natężenia prądu oraz układu pomiarowego promieniowania jonizującego.



Rys. 7.34 Przebiegi czasowe sygnałów z fotopowielacza oraz prądowego i napięciowego na uzwojeniu pierwotnym transformatora w momencie przebicia

7.5.2. Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu w układzie sfera-sfera o średnicy kul 20mm

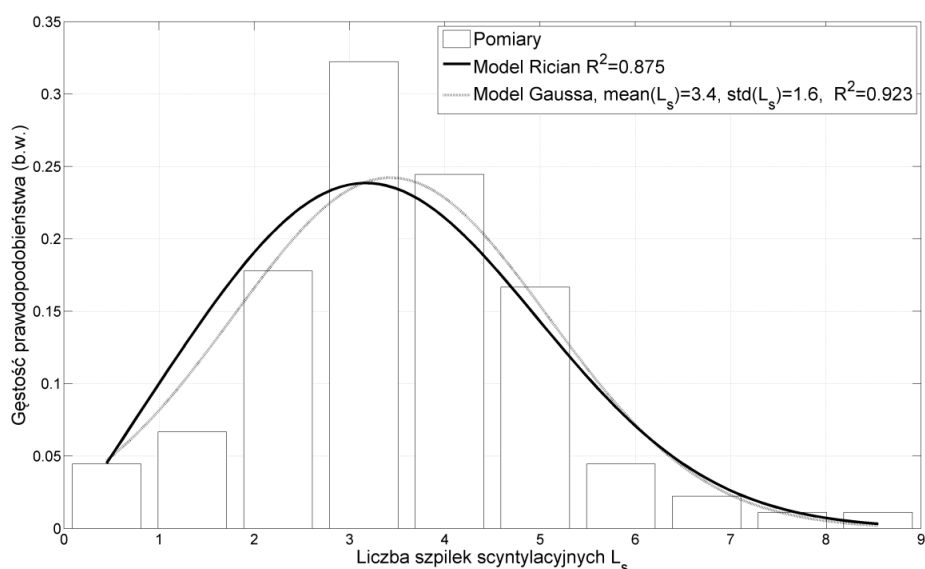
Badanie w układzie sfera-sfera wykazało sporą zależność rejestrowanych danych od odległości pomiędzy elektrodami. Zarówno maksymalna energia scyntylacji, suma energii w pomiarze i średnia energia na scyntylację w pomiarze rośnie wraz ze wzrostem odległości między iskiernikami. Zwiększenie dystansu sprawia, że napięcie przebicia również rośnie, a to może prowadzić

do zwiększenia się energii jonizacji cząsteczek powietrza i dalej do wyższych energii promieniowania hamującego, gdy cząsteczki wzbudzone wracają do stanu podstawowego. Spektrum energetyczne w tym układzie sugeruje, że największą ilość scyntylacji rejestruje się przy odległości między elektrodami równiej 120 mm. Zwiększenie dystansu powyżej 120 mm obniża ilość rejestrowanych scyntylacji natomiast wzrasta energia pojedynczych wzbudzeń. Widmo promieniowania wraz ze wzrostem odległości przesuwa się w kierunku wyższych energii jednocześnie zmniejszając liczbę rejestrowanych aktów scyntylacyjnych.

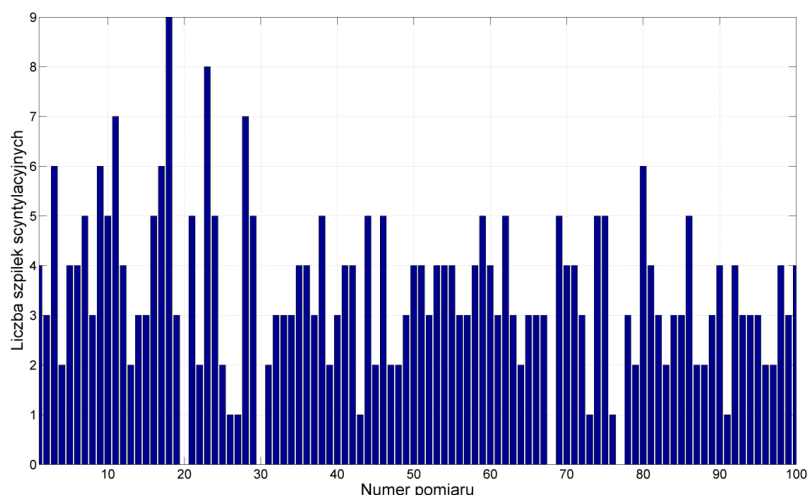
7.6. Badanie promieniowania wysokoenergetycznego w układzie sfera-sfera o średnicy kul 50mm, generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

7.6.1. Badanie powtarzalności wyników pomiarów promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

Wybrane i przedstawione poniżej przykładowe wyniki pomiarów badania promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w układzie sfera-sfera ϕ 50 mm są podobne do wyników uzyskanych w układzie sfera-sfera ϕ 20 mm. Wyniki powtarzalności pomiarów uzyskane w trakcie pomiaru zilustrowano na rysunkach 7.35 i 7.36.



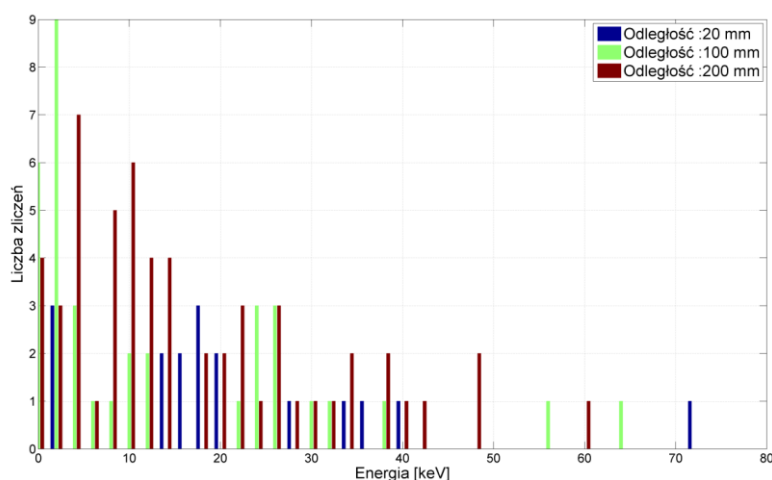
Rys. 7.35 Gęstość prawdopodobieństwa liczby scyntylacji w pomiarze. Wynik uzyskany dla układu sfera-sfera ϕ 50. Odległość między elektrodami wynosiła 200 mm



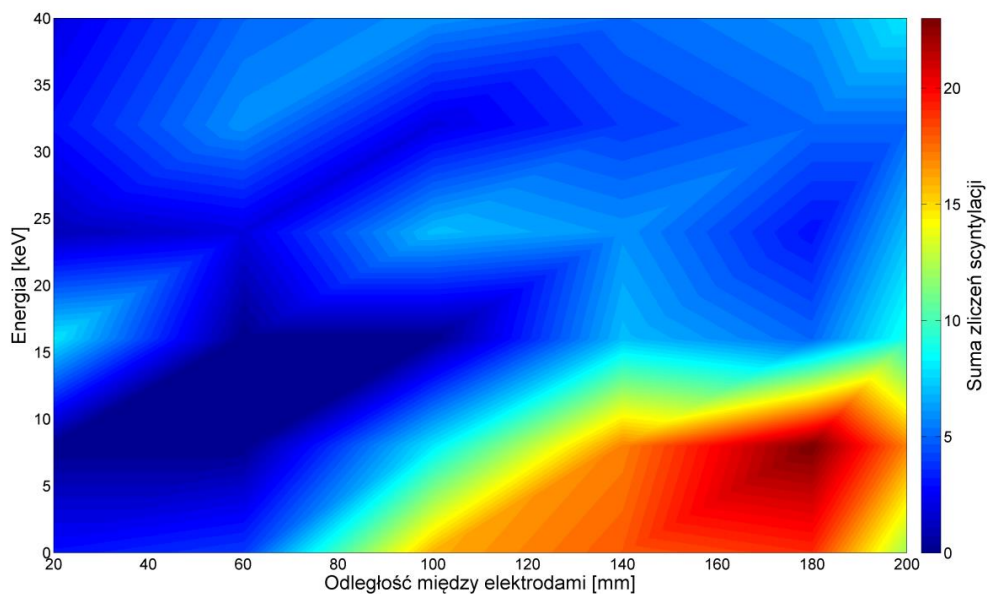
Rys. 7.36 Liczba scyntylacji dla każdego pomiaru. Wynik uzyskany dla układu sfera-sfera $\phi 50$.
Odległość między elektrodami wynosiła 200 mm

7.6.2. Badanie wpływu odległości między elektrodami na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego

Badanie wpływu odległości między iskiernikami na rejestrowaną liczbę scyntylacji i ich energię przeprowadzono dla 6 różnych wartości odległości. Na rysunku 7.37 ukazuje widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami, natomiast na rysunku 7.38 spektrum energetyczne zarejestrowane w tym układzie elektrod.

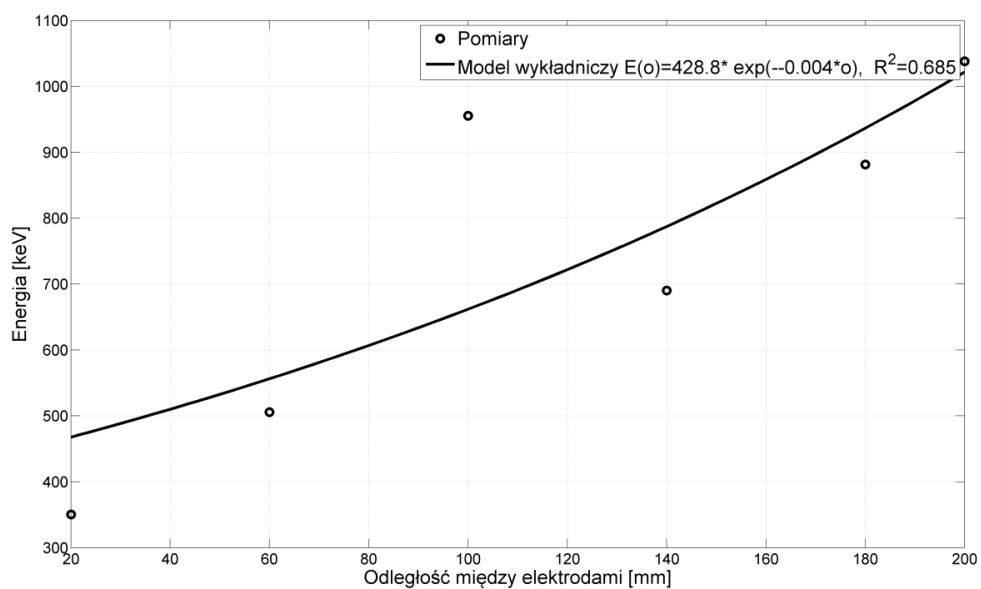


Rys. 7.37 Widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami. Badanie w powietrzu w układzie sfera-sfera $\phi 50$ mm w powietrzu

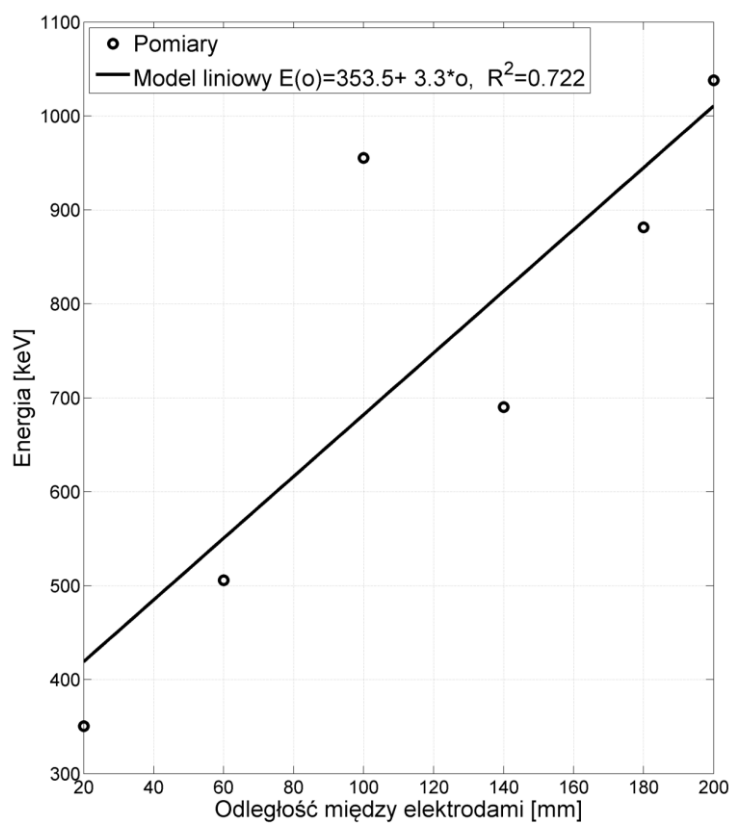


Rys. 7.38 Spektrum energii scyntylacji. Badanie w powietrzu w układzie sfera-sfera ϕ 50 mm w powietrzu

Przykładowe dane zarejestrowane w badaniu obrazują rysunki 7.39 i 7.40. Opisują one sumaryczną energię scyntylacji w zależności od odległości między elektrodami. Każdy wykres przybliży różne modele spełniające dopasowanie.

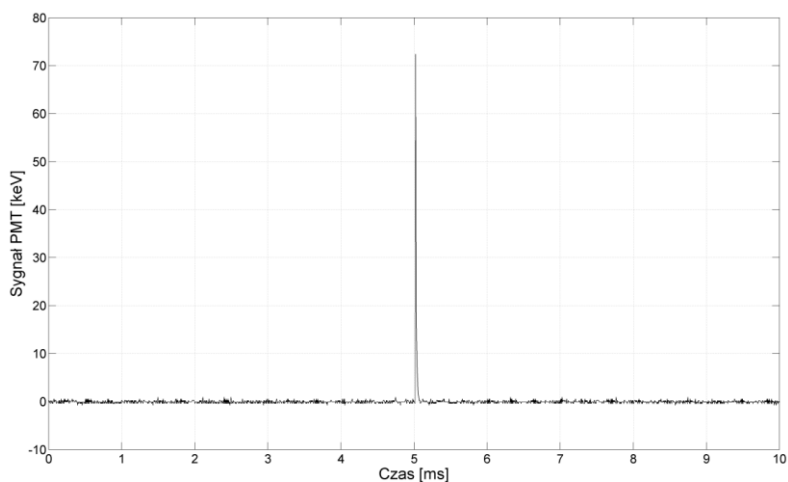


Rys. 7.39 Suma energii scyntylacji w zależności od odległości między elektrodami. Badanie w powietrzu w układzie sfera-sfera ϕ 50 mm w powietrzu

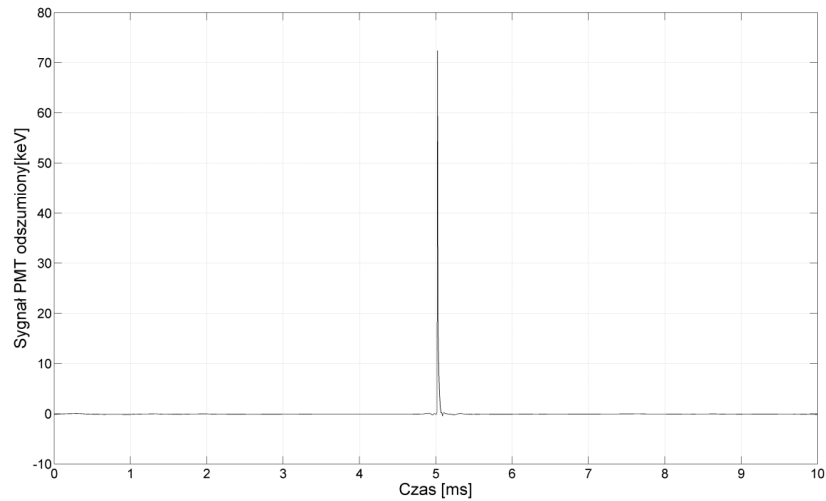


Rys. 7.40 Suma energii scyntylacji w zależności od odległości między elektrodami. Badanie w powietrzu w układzie sfera-sfera ϕ 50 mm w powietrzu

Przykładowe dane cząstkowe zarejestrowane w badaniu zestawione są na rysunku 7.41 i 7.42. Przedstawiają odpowiednio zarejestrowany pik scyntylacyjny oraz sygnał po usunięciu szumów i zakłóceń.

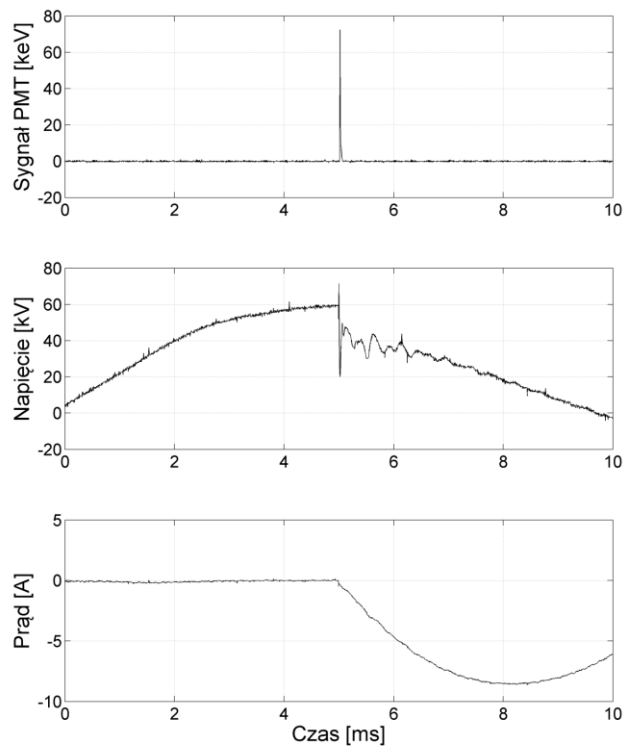


Rys. 7.41 Przykładowa scyntylacja zarejestrowana dla układu sfera-sfera ϕ 50 mm w powietrzu. Odległość między elektrodami 20 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 1 mm



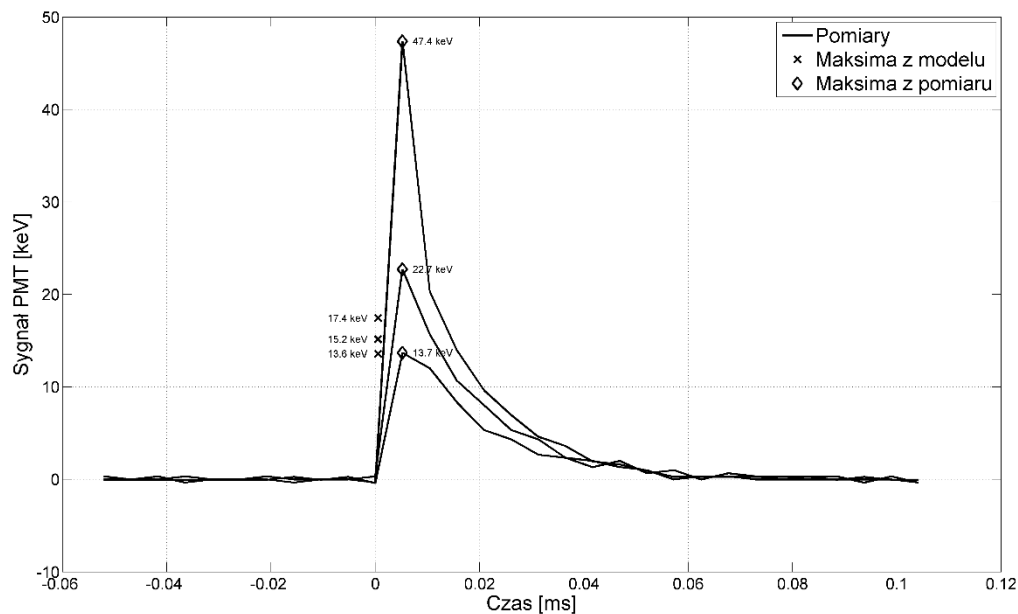
Rys. 7.42 Przykładowa scyntylicja z rysunku 7.41 po usunięciu szumów i zakłóceń

Natomiast rysunek 7.43 Ilustruje przebiegi czasowe sygnałów z zsynchronizowanych układów pomiarowych napięcia i natężenia prądu przebicia oraz sygnału z układu pomiarowego promieniowania jonizującego.

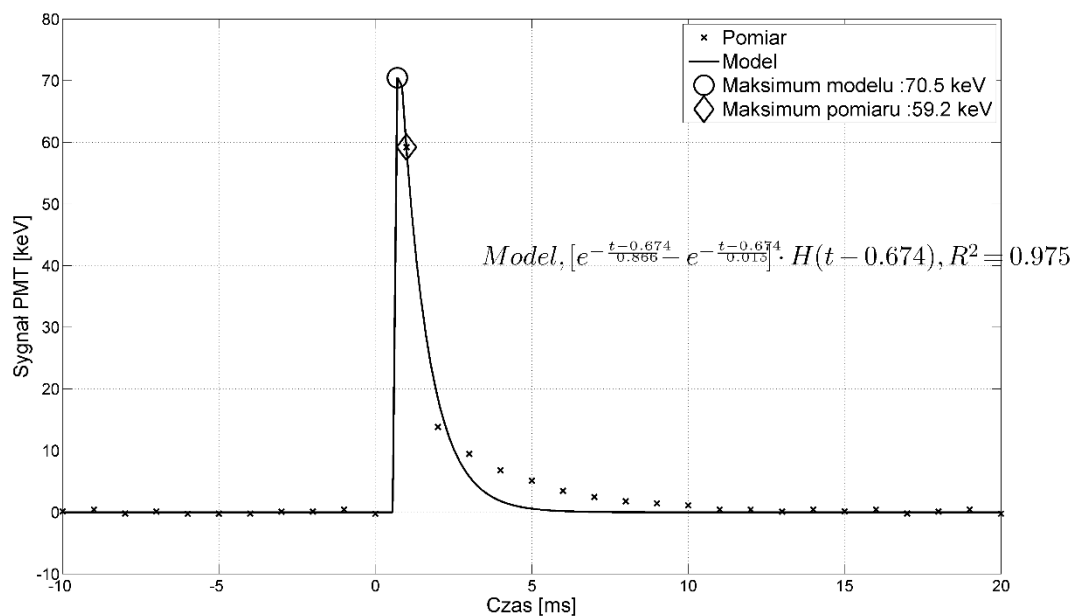


Rys. 7.43 Przebiegi czasowe sygnałów z fotopowielacza oraz prądowego i napięciowego na uzwojeniu pierwotnym transformatora w momencie przebicia w układzie sfera-sfera ϕ 50 mm w powietrzu

Na rysunku 7.44 i 7.45 zestawiono przykładowe modele scyntytacji dla układu sfera-sfera o ϕ 50 mm w powietrzu.



Rys. 7.44. Różne modele matematyczne przykładowej scyntytacji w układzie sfera-sfera o średnicy kul 50 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu



Rys. 7.45. Najlepiej dopasowany model przykładowej scyntytacji w układzie sfera-sfera o średnicy kul 50 mm w badaniu przeprowadzonym w powietrzu

7.6.3. Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu w układzie sfera-sfera o średnicy kul 50mm

Przeprowadzone badania powtarzalności wyników dla danego układu potwierdziły statystyczny charakter zjawiska promieniowania. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa jest zbliżony do rozkładu Gaussa. Badanie wpływu dystansu elektrody dodatniej od ujemnej sugerują zwiększenie się liczby scyntytacji jak i zwiększenie się ich energii wraz ze wzrostem odległości między iskiernikami. Suma energii rejestrowanej również wzrasta, co spowodowane może być wzrostem energii wyzwolanej w czasie przebiecia w układzie gdyż zwiększa się napięcie potrzebne do wyzwolenia wyładowania. Analizując widmo energetyczne zjawiska w danym układzie prawdopodobnie można wnioskować, iż wzrost odległości między elektrodami zwiększa nie tylko energię wzbudzenia i jonizacji cząsteczek, ale również liczbę aktów wzbudzenia.

7.7. Podsumowanie wyników badań promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu

Badania promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w powietrzu zostały wykonane dla 4 układów iskierników. Zbadano również wpływ zwiększania się odległości detektora od źródła wyładowań. Uzyskane wyniki sugerują wzrost sumarycznej energii rejestrowanego promieniowania wraz ze zwiększeniem odległości między elektrodami bez względu na geometrię iskierników. Wyjątkiem jest badanie w układzie ostrze- płyta gdzie nierównomierny rozkład pola elektromagnetycznego spowodował brak możliwości uzyskania wyników pozwalających na scharakteryzowanie zjawiska w tym układzie geometrycznym jak również nie potwierdza statystyczności zjawiska w każdym możliwym układzie. Z uzyskanych wyników można wnioskować również, iż w trakcie zjawiska wyładowań następuje wzrost liczby rejestrowanych scyntytacji i średnia energia scyntytacji w pomiarze. Zarejestrowane widmo przesuwają się w kierunku wyższych energii. Zwiększanie odległości pomiędzy detektorem, a źródłem wyładowań zwiększa liczbę rejestrowanych scyntytacji o niższej energii kosztem scyntytacji wysokoenergetycznych, a rejestrowane widmo przesuwają się w kierunku niższych energii, a tym samym zmniejsza się średnia energia rejestrowanej scyntytacji. Również suma energii rejestrowanej w pomiarze jest niższa im większa jest odległość detektora od źródła wyładowań. Kształt elektrod w układzie ma nieznaczny wpływ na spektrum energetyczne z wyjątkiem układu w geometrii z ostrzem i płytą. Podczas gdy w układzie ostrze-ostrze energia rejestrowana nieznacznie zmienia się wraz ze wzrostem odległości między elektrodami zwiększając liczbę rejestrowanych scyntytacji tak w układach z elektrodami sferycznymi wraz ze wzrostem energii przebiecia rośnie i liczba rejestrowanych pików scyntyacyjnych, a także ich energia.

8. Badania promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania zupełne w oleju

8.1. Opis układu pomiarowego

Układ pomiarowy składał się z zestawu iskierników zasilanego wysokim napięciem z transformatora oraz detektora scyntylacyjnego umieszczonego przy elektrodzie ujemnej lub też w pewnej odległości od tej elektrody. Detektor zamocowany na ramieniu konstrukcji ZPS3D. W skład układu pomiarowego wchodził również układ do wprowadzania pęcherzyków powietrza i argonu.

8.2. Sposób przeprowadzanie badań

Badania promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w oleju składały się z 3 etapów. Pierwszym z nich były badania w świeżym oleju w układzie elektrod ostrze-ostrze. Układ iskierników zanurzony był w kadzi olejowej. Detektor scyntylacyjny ustawiony był nad powierzchnią oleju przy elektrodzie ujemnej. Etap ten zawierał w sobie badanie 2 zależności: Zależność energii jonizacji od odległości między elektrodami oraz zależność rejestrowanej energii od odległości detektora od elektrody ujemnej. W badaniu zależności energii od odległości elektrod wykonano 10 serii pomiarowych w każdej po 5 prób. Dystans pomiędzy elektrodami wynosił od 4 mm do 30 mm zwiększany o 4 mm dla każdej serii pomiarowej, przy czym ostatnia odległość między elektrodami była 2 mm większa od przedostatniej. Wynikało to z geometrii układu i niemożności uzyskania większej odległości między elektrodami. Pomiarów wykonanych dla zależności energii rejestrowanej od odległości między detektorem i elektrodą ujemną wykonano dla odległości między elektrodami 22 mm. Odległość detektora zmieniała się od 0 (poziom powierzchni oleju) do 120 mm nad poziomem powierzchni olejowej. Odległość była zwiększana, co 20 mm w osi pionowej, co dało 7 serii pomiarowych po 5 powtórzeń w każdej.

Drugim etapem badań w oleju było generowanie wyładowań niezupełnych w układzie ostrze-ostrze, do którego wprowadzana pęcherzyki powietrza. Wykonano jedną serię pomiarową dla odległości między elektrodami 28 mm. Seria ta zawierała 10 powtórzeń.

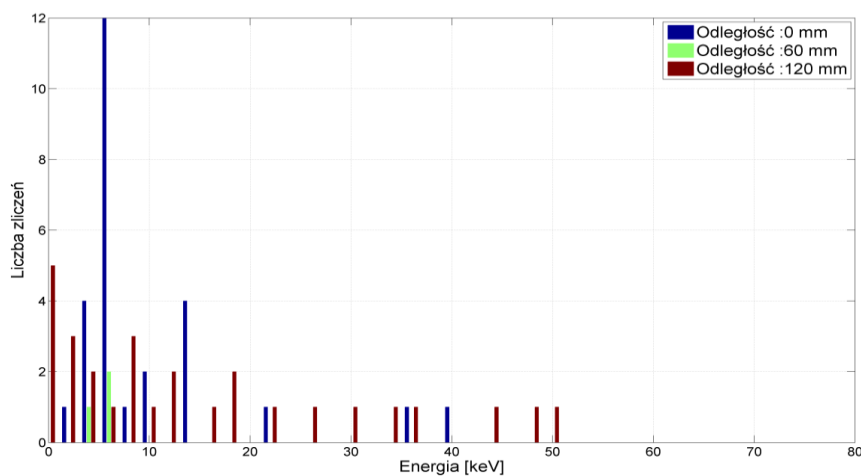
Trzecim etapem były badania w układzie ostrze-ostrze, do którego wprowadzono pęcherzyki argonu. Wykonano 8 serii pomiarowych, każda po 10 powtórzeń. Zależność energii rejestrowanej od odległości między elektrodami. Dystans ten zwiększany był od 4 mm do 28 mm, co 4 mm każda seria. Dla każdej odległości wykonano 10 powtórzeń. Częstość wprowadzanych pęcherzyków argonu wynosiła około 10 pęcherzyków na sekundę.

Każde badanie polegało na zwiększaniu napięcia na elektrodzie dodatniej od 0 aż do momentu przebicia oleju. Urządzenie pomiarowe zsynchronizowane z urządzeniem generującym wyładowania zupełne rejestrowało energię w momencie przebicia. Przykładowe zarejestrowane dane zostały zebrane w następujących rozdziałach.

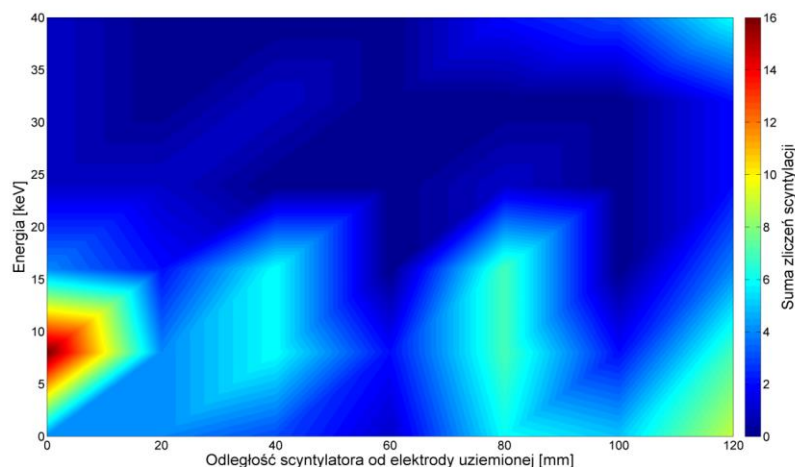
8.3. Badanie promieniowania wysokoenergetycznego w układzie ostrze-ostrze generowanego przez wyładowania zupełne w oleju

8.3.1. Badanie wpływu odległości scyntylatora od elektrody ujemnej na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania zupełne w oleju

Badania zależności energii promieniowania od odległości detektora od elektrody ujemnej zanurzonej w oleju przeprowadzono dla dystansu między elektrodami 22 mm. Odległość detektora zmieniała się od 0 mm do 120 mm nad powierzchnią oleju, co dało 7 serii pomiarowych. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 8.1 ukazującym widmo energetyczne zjawiska dla wybranych odległości i rysunku 8.2 obrazującym spektrum energetyczne dla tego badania.



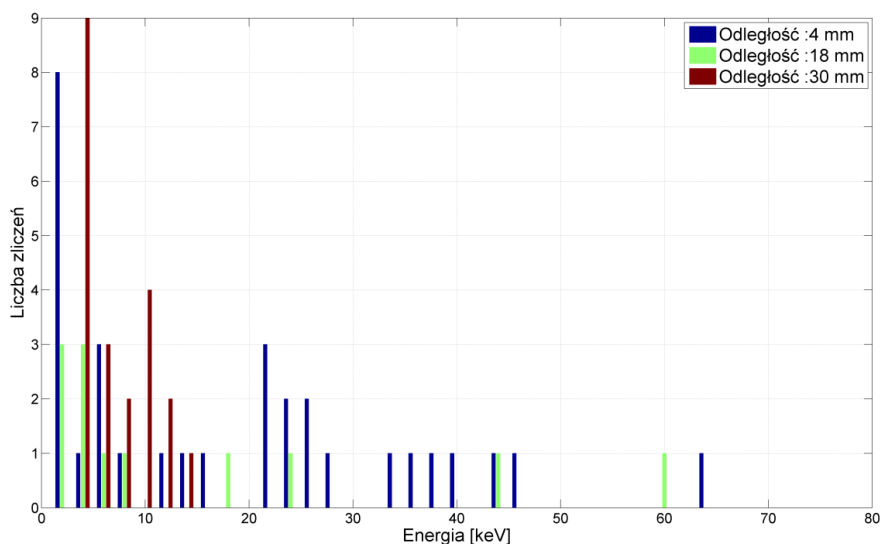
Rys. 8.1 Widmo energetyczne dla wybranych odległości między detektorem a elektrodą ujemną.
Badanie w oleju w układzie ostrze-ostrze



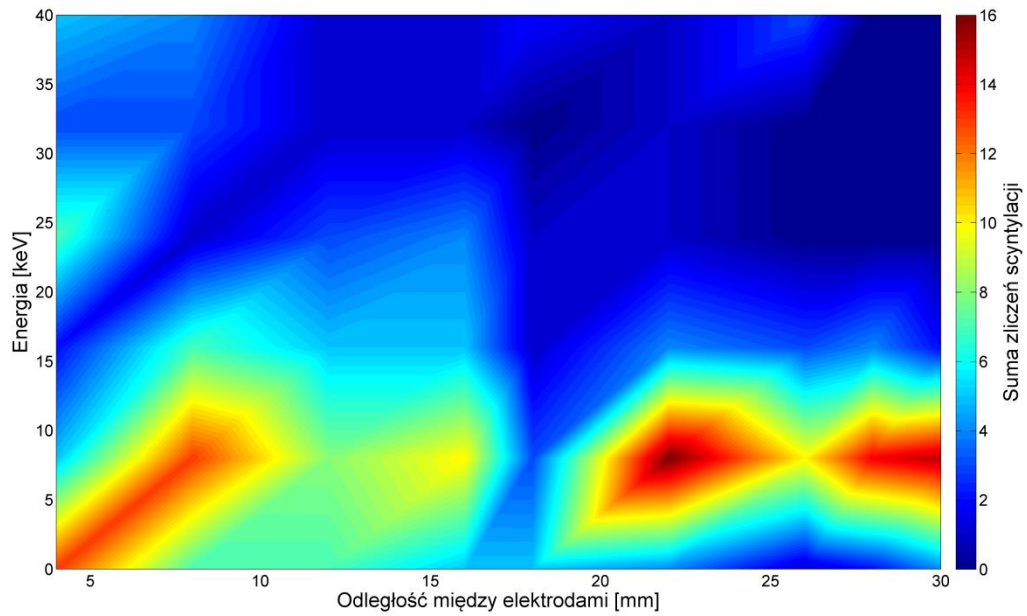
Rys. 8.2 Spektrum energii scyntylacji w zależności od odległości między detektorem a elektrodą ujemną. Badanie w oleju w układzie ostrze-ostrze

8.3.2. Badanie wpływu odległości między elektrodami na wyniki pomiarów promieniowania wysokoenergetycznego

Badanie wpływu odległości między iskiernikami na rejestrowaną liczbę scyntylacji i ich energię przeprowadzono dla 9 różnych wartości odległości od 4 mm do 30 mm. Rysunek 8.3 przedstawia widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami, natomiast rysunek 8.4 odzwierciedla spektrum energetyczne zarejestrowane w tym układzie elektrod.

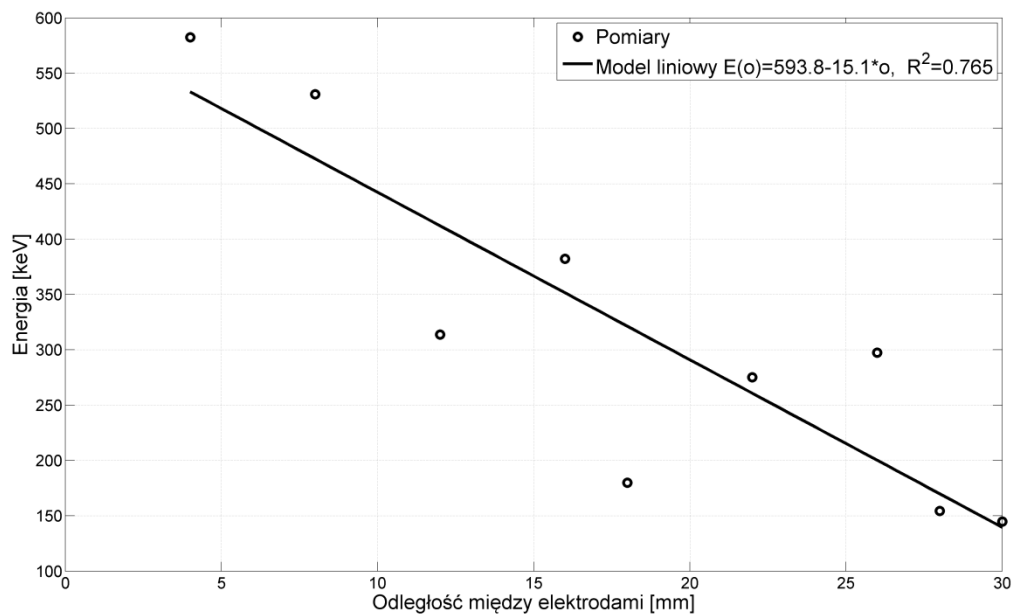


Rys. 8.3 Widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami. Badanie w oleju w układzie ostrze-ostrze

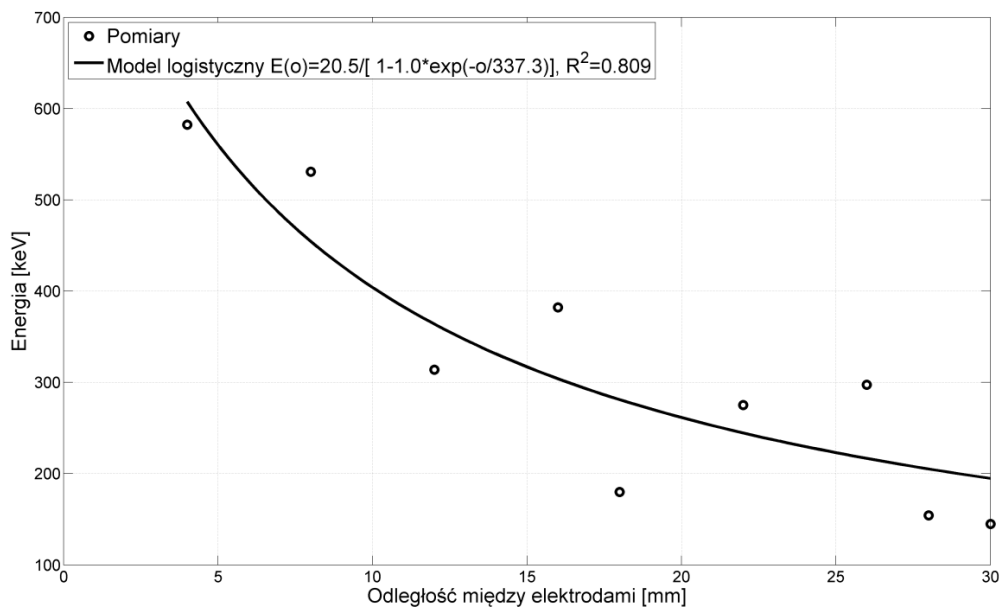


Rys. 8.4 Spektrum energii zarejestrowane w układzie ostrze-ostrze zanurzone w oleju

Na rysunku 8.5 i 8.6 zestawiono charakterystyki sumy energii scytlacji w zależności od odległości między elektrodami. Rysunki prezentują różne modele spełniające dopasowanie.



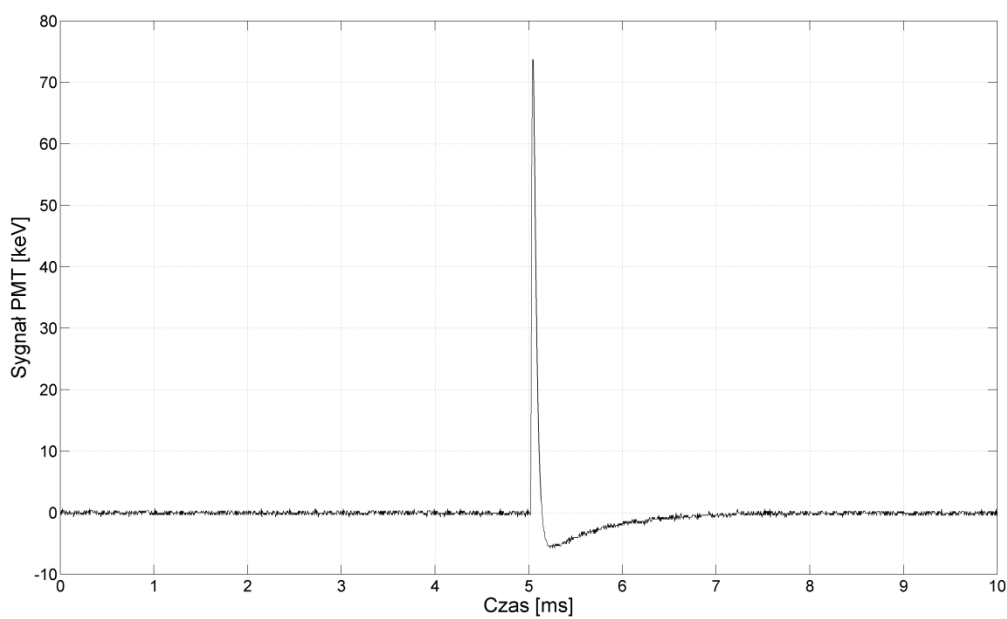
Rys. 8.5 Suma energii rejestrowanej w zależności od odległości między elektrodami. Badanie w oleju w układzie ostrze-ostrze



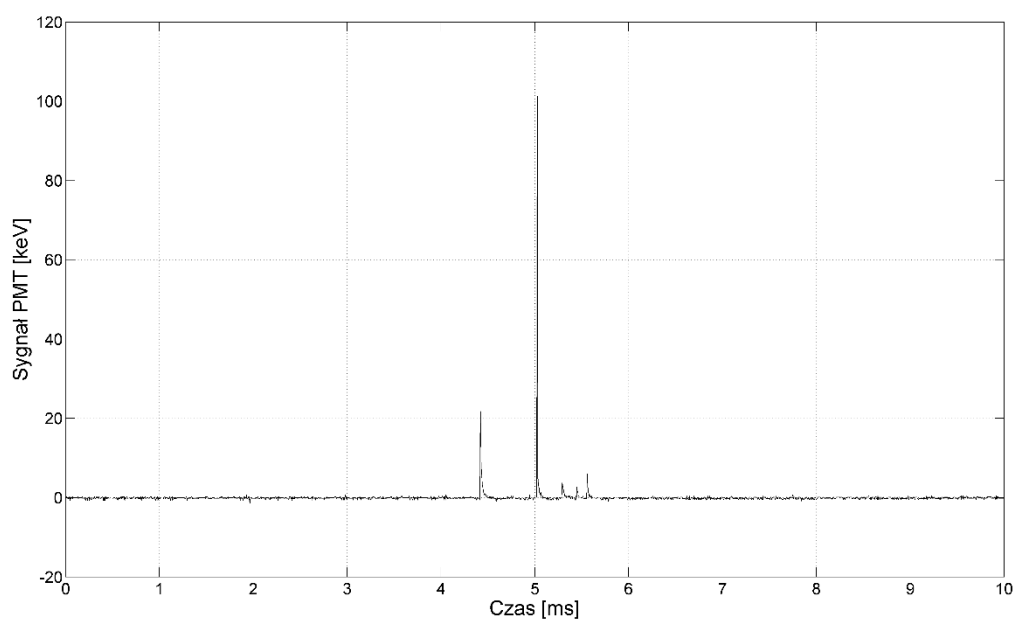
Rys. 8.6 Suma energii rejestrowanej w zależności od odległości między elektrodami. Badanie w oleju w układzie ostrze-ostrze

Przykładowe dane cząstkowe zarejestrowane w badaniu są przedstawione na rysunku 8.7, 8.8. Opisują zarejestrowany pik scyntylacyjny oraz sygnał po usunięciu szumów i zakłóceń.

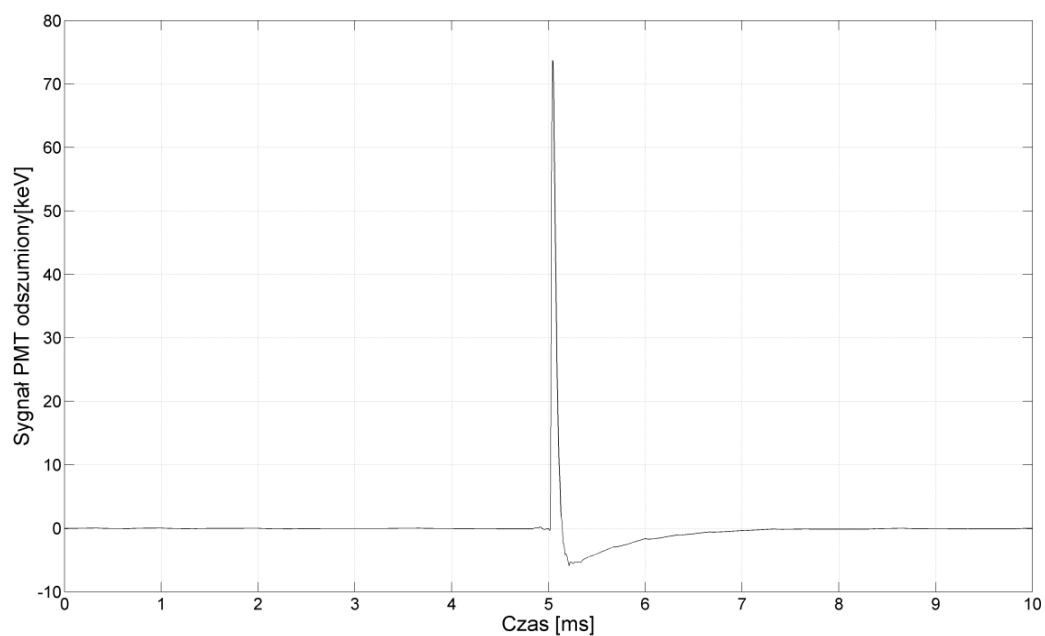
a)



b)

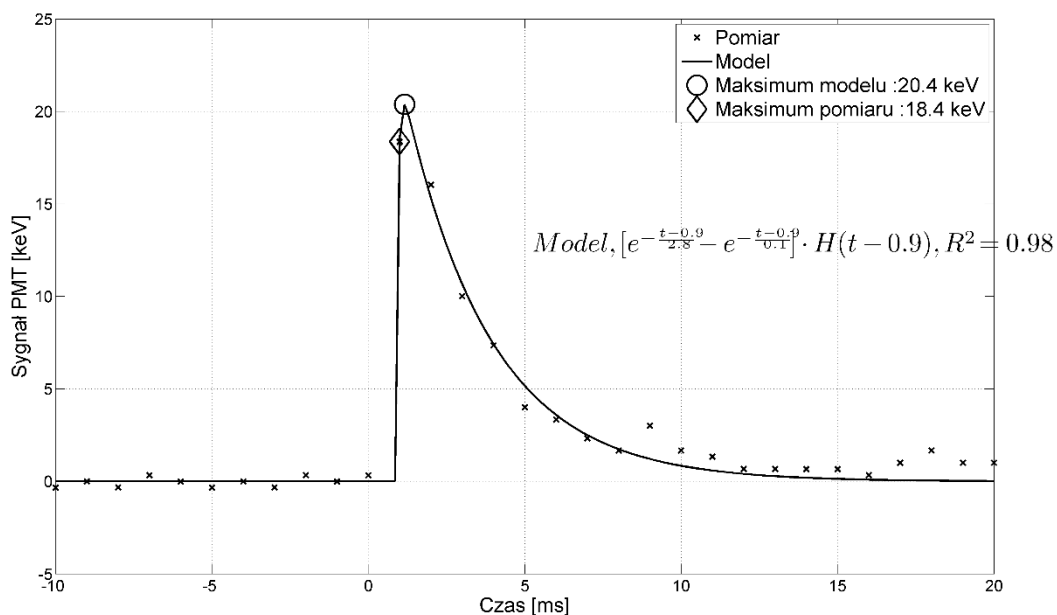


Rys. 8.7 Przykładowa scyntylacja zarejestrowana dla układu: a) Odległość między elektrodami 12mm, b) Odległość między elektrodami 16mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 80 mm

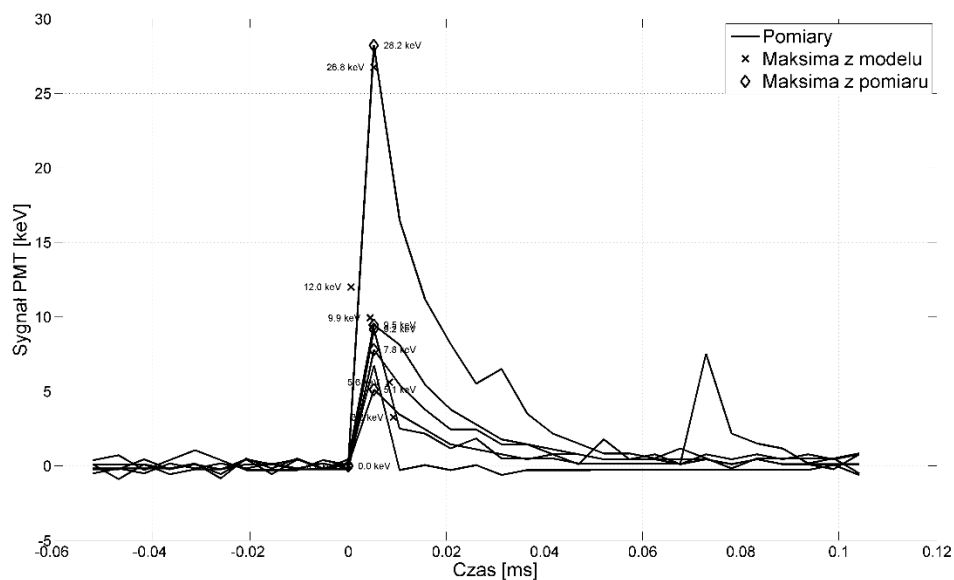


Rys. 8.8 Przykładowa scyntylacja z rysunków 8.7a. po usunięciu szumów i zakłóceń. Badanie w oleju w układzie ostrze-ostrze

Na rysunku 8.9 i 8.10 zestawiono przykładowe modele scyntylacji dla układu ostrze-ostrze zanurzony w oleju mineralnym.

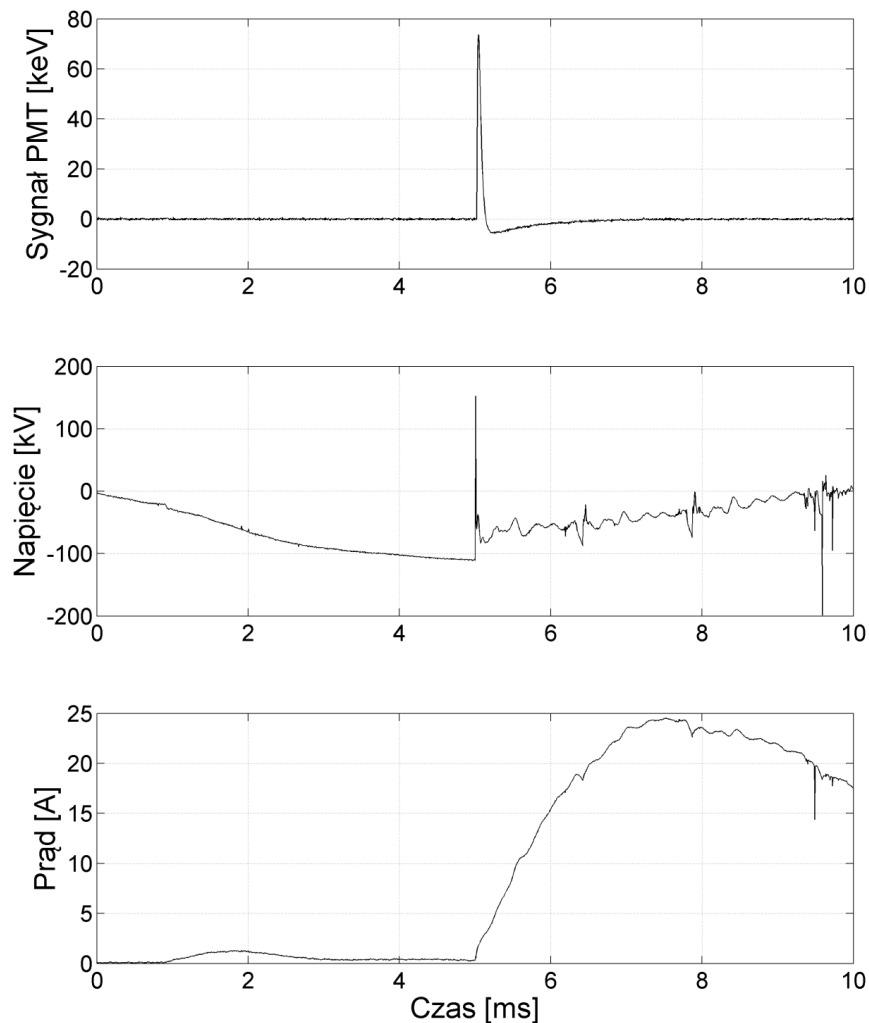


Rys. 8.9 Najlepiej dopasowany model przykładowej scyntylacji. Badanie przeprowadzone w oleju w układzie ostrze-ostrze. Odległość między elektrodami wynosiła 12 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 80 mm



Rys. 8.10 Różne modele matematyczne przykładowej scyntylacji. Badanie w oleju w układzie ostrze-ostrze. Odległość między elektrodami 12 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 80 mm

Rysunek 8.11 ilustruje przebiegi czasowe sygnałów z zsynchronizowanych układów pomiarowych napięcia i natężenia prądu oraz układu pomiarowego promieniowania jonizującego



Rys. 8.11 Przebiegi czasowe sygnałów z fotopowielacza oraz prądowego i napięciowego na uzwojeniu pierwotnym transformatora w momencie przebicia. Badanie w oleju w układzie ostrze-ostrze

8.3.3. Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania zupełne w oleju w układzie ostrze-ostrze

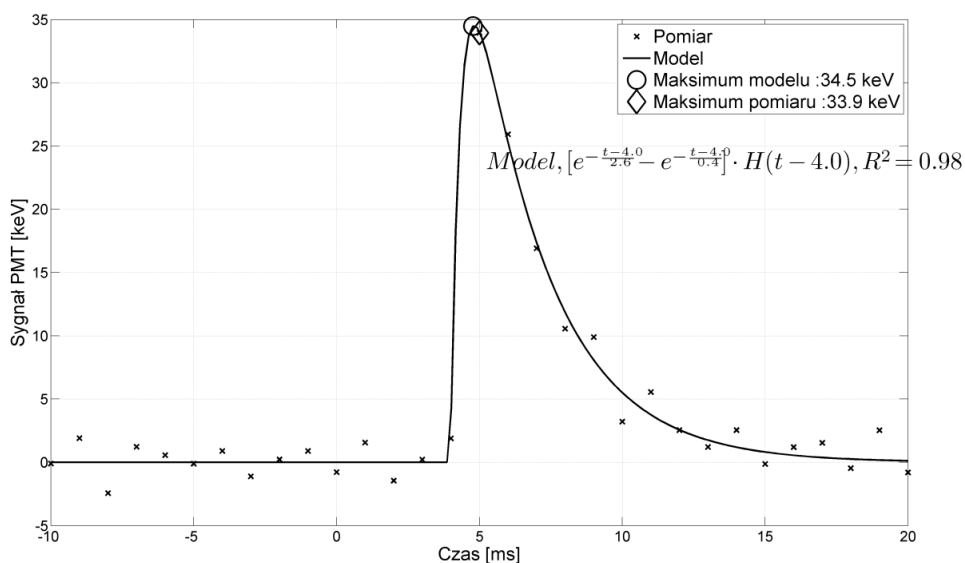
Wyniki zarejestrowane w trakcie badania promieniowania jonizującego generowanego przez układ ostrze-ostrze zanurzony w oleju znacznie różnią się od badań w powietrzu. Badanie zależności rejestrowanej energii od odległości między iskiernikami wykazały zmniejszanie się sumy energii rejestrowanej wraz ze wzrostem dystansu. Spadła również wartość średnia pojedynczej scyntylacji.

Natomiast widmo energetyczne przesuwają się w kierunku mniejszych energii jednocześnie zwiększając liczbę rejestrowanych scyntytacji. W badaniu zależności odległości detektora od źródła wyładowania zupełnego zauważyć można zmniejszenie się liczby rejestrowanych scyntytacji natomiast energia zmierzonych aktów jonizacji pozostaje na podobnym poziomie. Widmo energetyczne zjawiska zauważalnie wskazuje na zmniejszoną liczbę rejestrowanych scyntytacji natomiast ich wartość energetyczna rośnie.

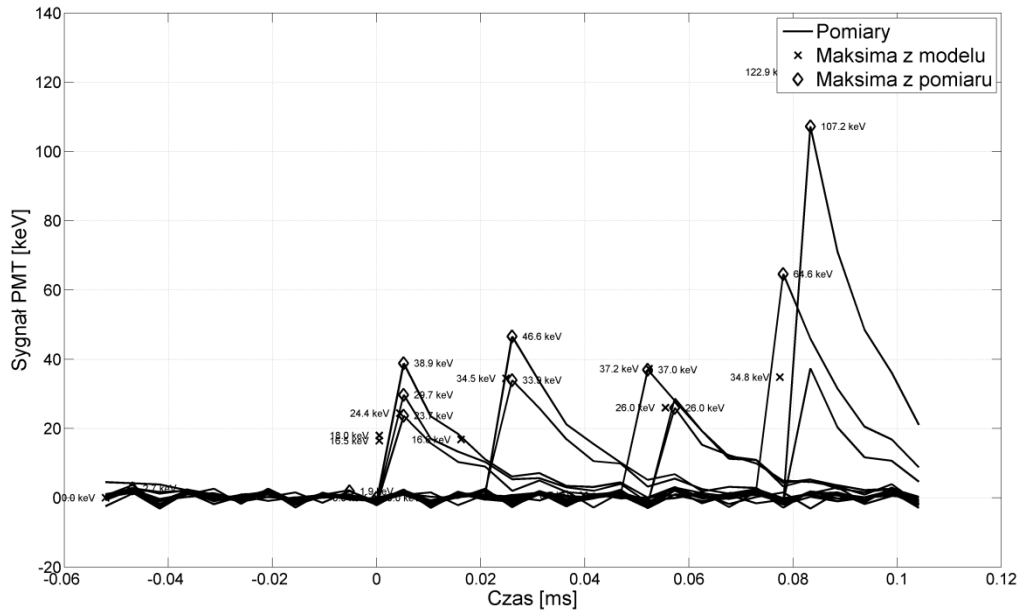
8.4. Badanie promieniowania wysokoenergetycznego w układzie ostrze-ostrze generowanego przez wyładowania zupełne w oleju z pęcherzykami powietrza i argonu

8.4.1. Badanie wpływu wprowadzenia pęcherzyków powietrza pomiędzy elektrody zanurzone w oleju mineralnym

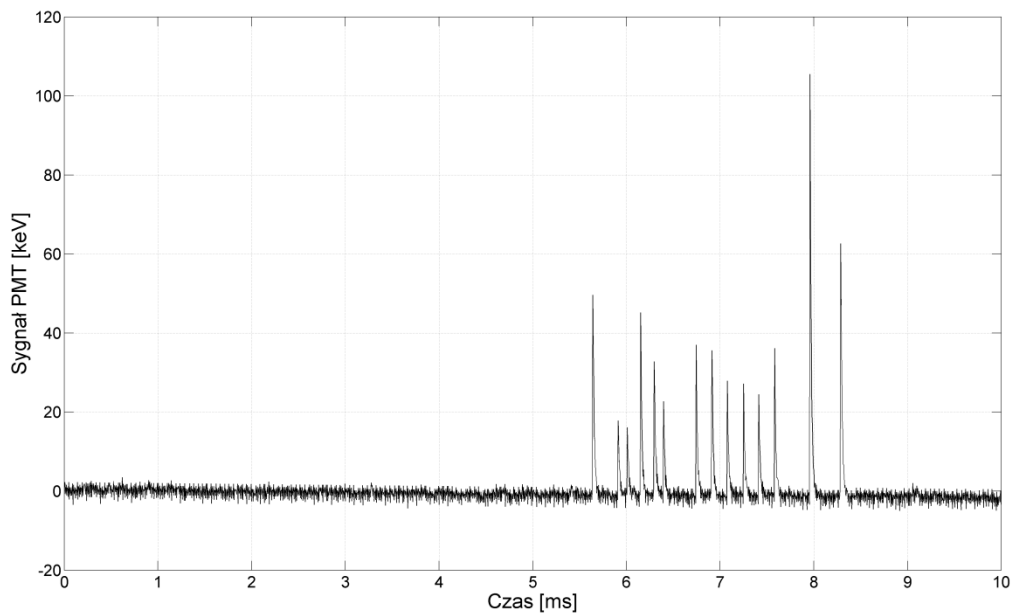
W układzie ostrze-ostrze zanurzone w oleju przeprowadzono również badanie jak wprowadzenie pęcherzyków powietrza wpłynie na rejestrowane wyniki. Przykładowe wykresy i opracowane dane pomiarowe zaprezentowano poniżej na rysunkach 8.12, 8.13, 8.14, 8.15. Rysunki przedstawiają odpowiednio próbę zamodelowania rejestrowanych scyntytacji w tym układzie jak i same przykładowe zarejestrowane dane.



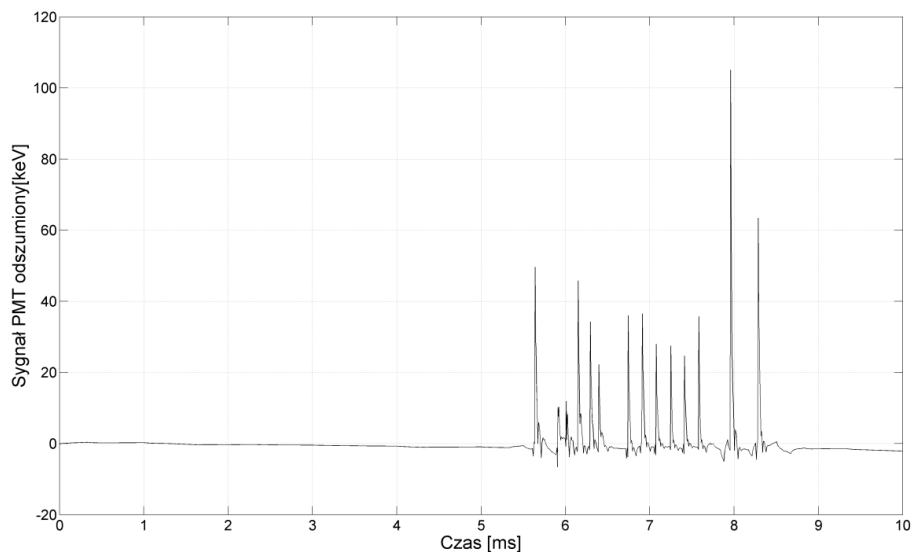
Rys. 8.12 Najlepiej dopasowany model przykładowej scyntytacji. Badanie w układzie ostrze-ostrze zanurzone w oleju, do którego wprowadzono pęcherzyki powietrza. Odległość między elektrodami 28 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 80 mm



Rys. 8.13 Różne modele matematyczne przykładowej scyntylacji. Badanie w układzie ostrze-ostrze zanurzone w oleju, do którego wprowadzono pęcherzyki powietrza. Odległość między elektrodami 28 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 80 mm



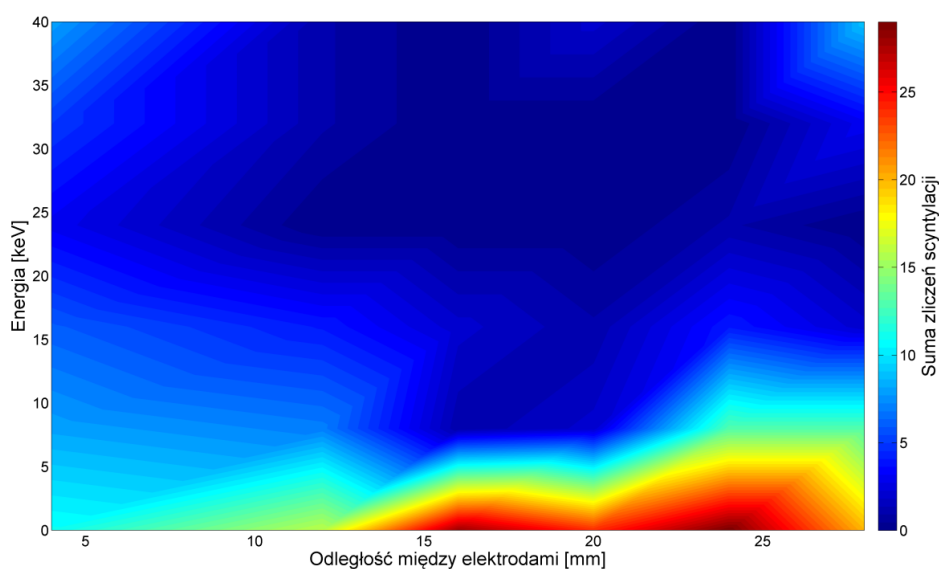
Rys. 8.14 Przykładowa scyntylacja zarejestrowana dla układu. Odległość między elektrodami 28 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 80 mm. Wprowadzano około 10 pęcherzyków powietrza na sekundę



Rys. 8.15 Przykładowa scyntylacja z rysunku 8.14 po usunięciu szumów i zakłóceń

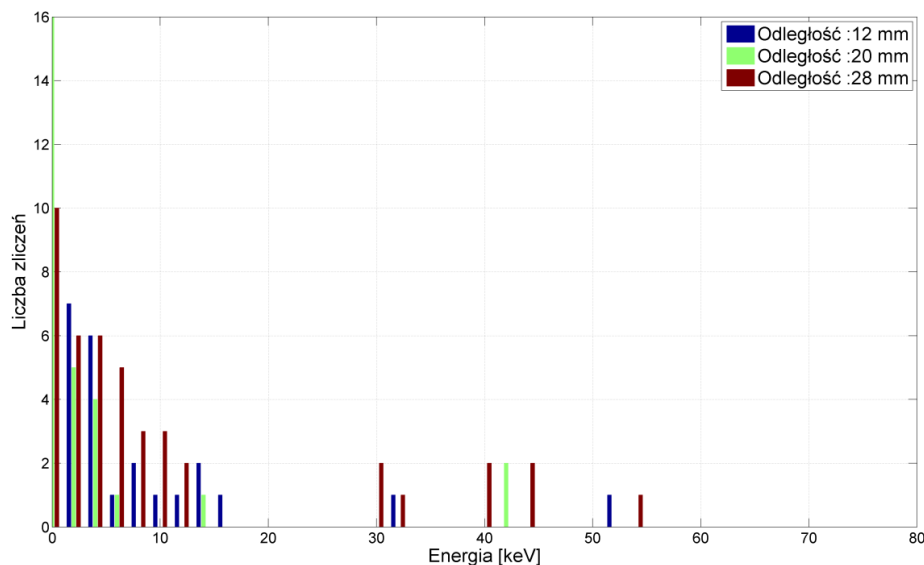
8.4.2. Badanie wpływu wprowadzenia pęcherzyków argonu pomiędzy elektrody zanurzone w oleju

Kolejnym przeprowadzonym badaniem było wprowadzanie pęcherzyków argonu do układu ostrze-ostrze zanurzone w oleju mineralnym. Zarejestrowane spektrum energetyczne zobrazowano na rysunku 8.16. W czasie badania zwiększano odległość między elektrodami i rejestrowano liczbę scyntylacji oraz ich energię w zależności od tego dystansu.



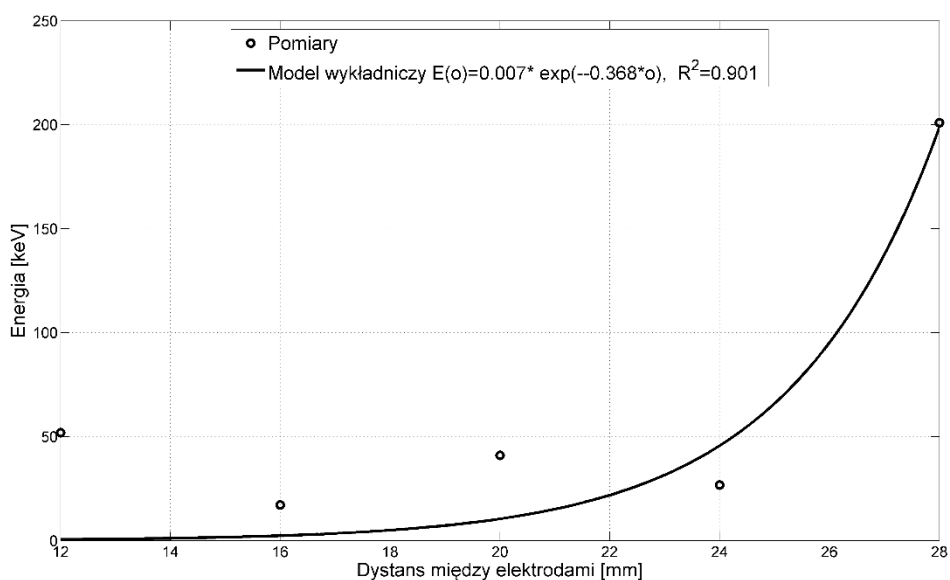
Rys.8.16 Spektrum energii zarejestrowane w układzie ostrze-ostrze zanurzone w oleju, do którego wprowadzono pęcherzyki Ar. Częstotliwość pojawiania się pęcherzyka to około 10 Hz

Rysunek 8.17 przedstawia widmo energetyczne dla wybranych odległości między elektrodami. Badania natomiast wykonano dla sześciu różnych odległości między iskiernikami.

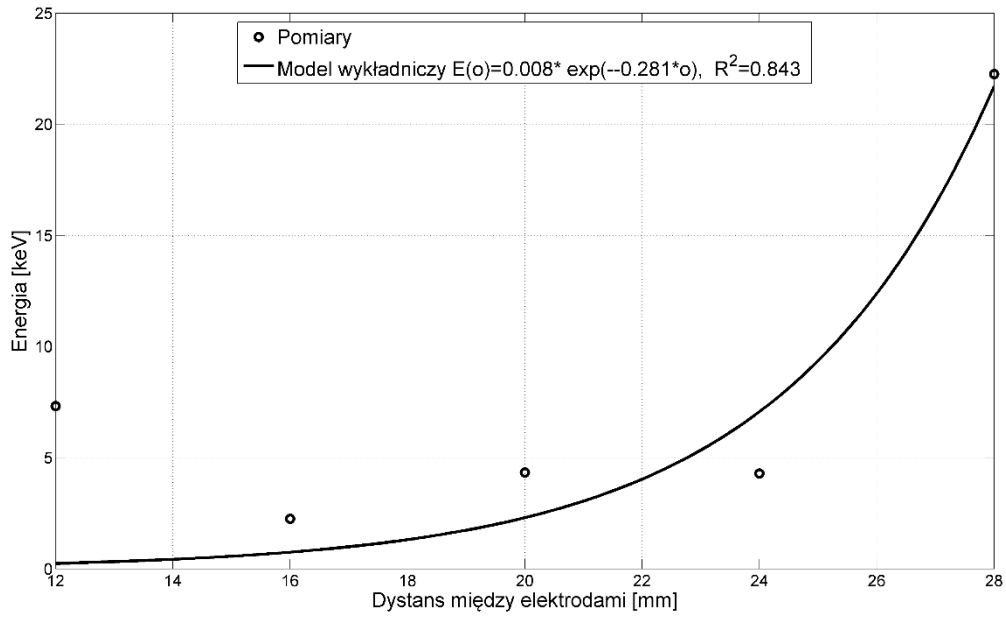


Rys. 8.17 Widmo energetyczne dla wybranych odległości. Badanie w układzie ostrze-ostrze zanurzone w oleju, do którego wprowadzono pęcherzyki argonu. Częstotliwość pojawiania się pęcherzyka to około 10 Hz

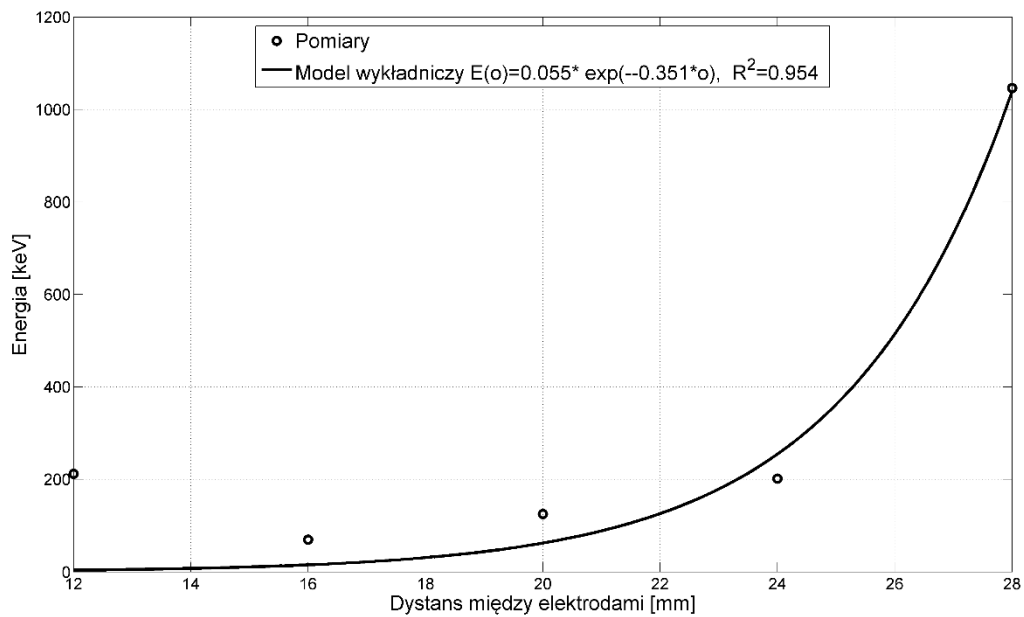
Zbadany układ dostarczył danych, dzięki którym można było wyznaczyć maksymalną, średnią i sumaryczną energię rejestrowanych scyntytacji. Zależności te zostały zestawione na rysunkach odpowiednio 8.18, 8.19 i 8.20.



Rys. 8.18 Maksymalna energia rejestrowana w zależności od odległości między elektrodami. Badanie w układzie ostrze-ostrze zanurzone w oleju, do którego wprowadzono pęcherzyki argonu. Częstotliwość pojawiania się pęcherzyka to około 10 Hz

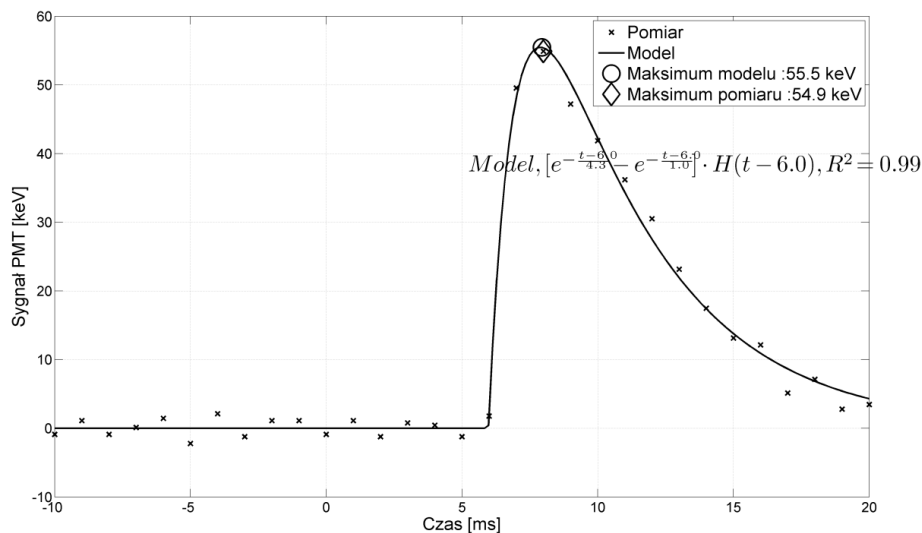


Rys. 8.19 Średnia energia rejestrowana w zależności od odległości między elektrodami. Badanie w układzie ostrze-ostrze zanurzone w oleju, do którego wprowadzono pęcherzyki argonu. Częstotliwość pojawiania się pęcherzyka to około 10 Hz

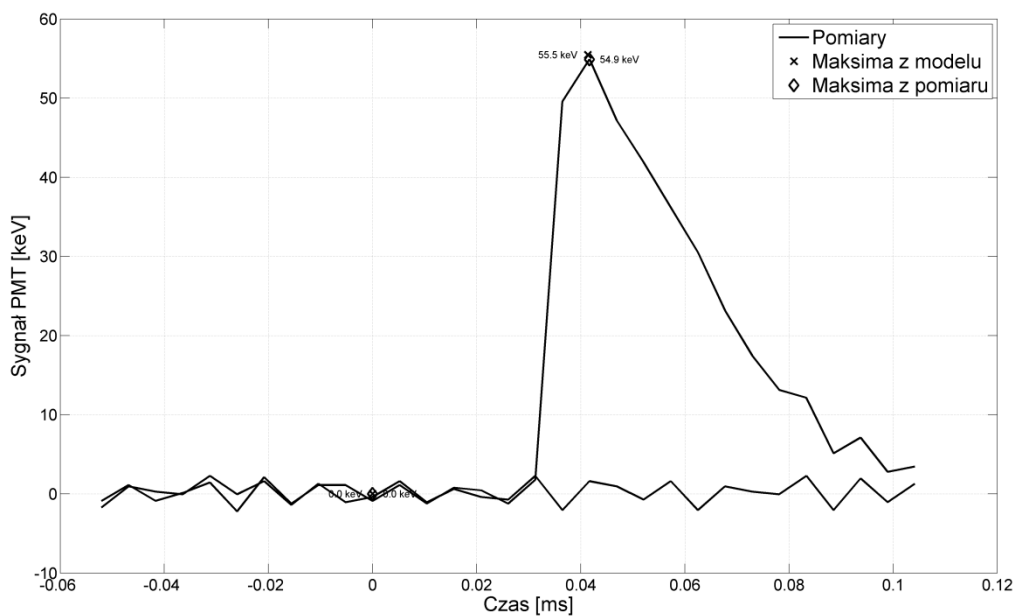


Rys. 8.20 Suma energii rejestrowanej w zależności od odległości między elektrodami. Badanie w układzie ostrze-ostrze zanurzone w oleju, do którego wprowadzono pęcherzyki argonu. Częstotliwość pojawiania się pęcherzyka to około 10 Hz

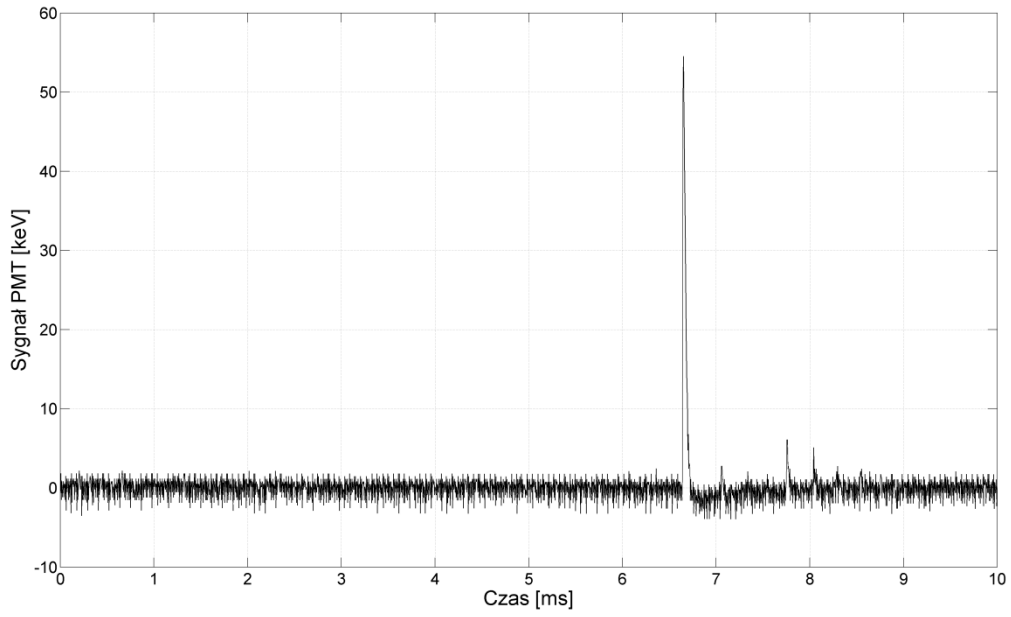
Również dla tego badania wykonano analizę danych oraz zaprezentowano wybrane ich opracowania. Przykładowe wykresy i opracowane dane pomiarowe przedstawiono poniżej na rysunkach 8.21, 8.22, 8.23, 8.24. Rysunki ilustrują odpowiednio próbę zamodelowania rejestrowanych scyntyacji w tym układzie jak i same przykładowe zarejestrowane dane.



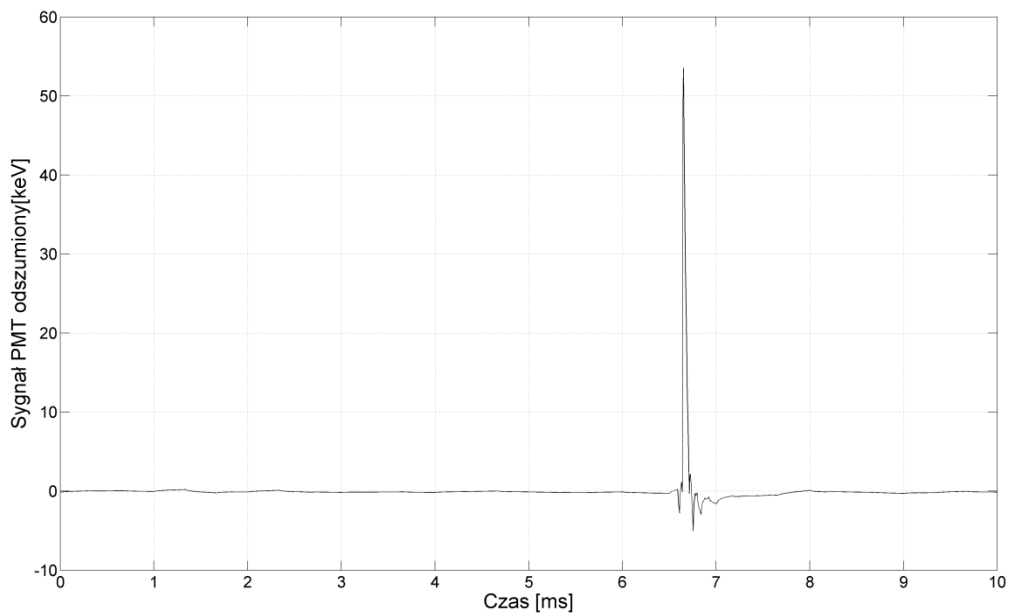
Rys.8.21 Najlepiej dopasowany model przykładowej scyntyacji. Badanie w układzie ostrze-ostrze zanurzonym w oleju, do którego wprowadzono pęcherzyki argonu. Odległość między elektrodami 28 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 80 mm



Rys. 8.22 Różne modele matematyczne przykładowej scyntyacji. Badanie w układzie ostrze-ostrze zanurzonym w oleju, do którego wprowadzono pęcherzyki powietrza. Odległość między elektrodami 28 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 80 mm



Rys. 8.23 Przykładowa scyntylacja zarejestrowana dla układu. Odległość między elektrodami 28 mm. Odległość detektora od elektrody ujemnej 80 mm



Rys. 8.24 Przykładowa scyntylacja z rysunku 8.23. po usunięciu szumów i zakłóceń

8.4.3. Podsumowanie wyników badań promieniowania wysokoenergetycznego w układzie ostrze-ostrze generowanego przez wyładowania zupełne w oleju z pęcherzykami powietrza i argonu

Badanie wpływu wprowadzenia pęcherzyków powietrza i pęcherzyków argonu pomiędzy elektrody układu ostrze-ostrze zanurzonego w oleju zmniejszyło napięcie przebicia w ośrodku. Wprowadzenie pęcherzyków argonu spowodowało zmiany w układzie i rejestrowane wyniki zbliżyły się do tych uzyskiwanych dla badań w powietrzu. Wraz ze wzrostem odległości między elektrodami wzrastała sumaryczna ilość energii w pomiarze, średnia energia pików scyntylacyjnego oraz maksymalna rejestrowana energia scyntylacji. Spektrum energetyczne również wykazało zależność wzrostu energii rejestrowanej wraz ze wzrostem wartości odległości między elektrodami. Widmo energetyczne wykazało zwiększenie liczby rejestrowanych scyntylacji. Dla badań z pęcherzykami powietrza nie rejestrowano widma natomiast badanie to miało dać odpowiedź czy wprowadzenie pęcherzyków powietrza, czyli mieszaniny gazów mających różne ilości elektronów walencyjnych spowoduje zmianę ilości rejestrowanych danych. Odpowiedź nie była jednoznaczna, wprowadzenie pęcherzyków powietrza zakłócało prace całego układu.

8.5. Podsumowanie wyników badań promieniowania wysokoenergetycznego generowanego przez wyładowania zupełne w oleju

W trakcie badań w układzie ostrze-ostrze zanurzonym w oleju zarejestrowano dane, które zupełnie inaczej charakteryzują zjawisko w tym ośrodku niż w powietrzu. Sugeruje się, że olej, jako ośrodek gęstszy oraz bardziej odporny na przebicia elektryczne lepiej tłumi i zmniejsza zasięg generowanego promieniowania jonizującego. Większa odległość między elektrodami to również większa odległość detektora od elektrody dodatniej, która generuje powstanie wyładowania zupełnego i to od niej zaczyna się zjawisko wzbudzenia i jonizacji ośrodka. Jest to rozwinięcie badania zależności odległości między detektorem, a źródłem wyładowań. Wprowadzenie do układu pęcherzyków powietrza zaburza pracę układu i w takiej geometrii nie jest możliwe otrzymanie miarodajnych wyników. Natomiast wprowadzenie pęcherzyków argonu, gazu szlachetnego spowodowało zwiększenie rejestracji scyntylacji pomimo zwiększania odległości między elektrodami. Argon, jako gaz neutralny (niereaktywny) zwiększył zasięg promieniowania natomiast zwiększanie odległości między elektrodami nadal zwiększało napięcie przebicia i energię wyzwalaną w trakcie zjawiska jak to miało miejsce w powietrzu.

9. Podsumowanie badań, wnioski i problemy otwarte

W ramach niniejszej dysertacji wykonano szereg pomiarów dotyczących zjawiska generowania wysokoenergetycznego promieniowania jonizującego przez wyładowania elektryczne w dwóch środowiskach izolacyjnych. Badania opierały się na detekcji i mierzeniu energii promieniowania jonizującego powstającego w czasie wyładowań zupełnych i niezupełnych w oleju mineralnym i powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym. Przebadano szereg różnych układów geometrycznych iskierników oraz różne zależności wpływające na wyniki pomiarów w tym odległość między elektrodami oraz dystans pomiędzy elektrodą o niższym potencjale, a detektorem promieniowania.

Wszystkie pomiary wykonano za pomocą urządzeń i detektorów własnej konstrukcji. Zbudowanie aparatury pomiarowej było możliwe dzięki środkom finansowym z projektu PRELUDIUM, którego autor pracy jest kierownikiem. Skonstruowany detektor oraz urządzenia umożliwiające wygenerowanie zjawiska oraz przesłanie i opracowanie danych są urządzeniami opartymi na znanej technologii i metodyce badań zjawisk podstawowych, jakimi są wyładowania elektryczne i detekcja promieniowania, natomiast koncepcja badań interdyscyplinarnych i posiadających elementy synergii jest oryginalnym pomysłem autora.

Wyniki pomiarów sugerują, iż możliwa jest detekcja wysokoenergetycznego promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania elektryczne zarówno w powietrzu jak i w oleju mineralnym oraz iż możliwe jest zmierzenie energii tego zjawiska. Z badań wynika również, że często geometria układu elektrod w laboratorium jak i środowisko, w którym przeprowadza się eksperyment mają wpływ na uzyskane wyniki. Ponadto wprowadzanie dodatkowych zakłóceń do obszaru badanego np. pęcherzyków powietrza czy argonu do oleju mineralnego (pomiędzy elektrody) zmienia fizykę zjawiska oraz rejestrowane dane.

Uzyskane dane pomiarowe pozwoliły stwierdzić, iż teza sformułowana w rozdziale drugim jest spełniona. Analiza zarejestrowanych zjawisk oraz opracowanie danych, które na nią pozwoliły została wykonana w oparciu o dedykowane do tego badania oprogramowanie napisane w środowisku MATLAB.

Oryginalnymi wynikami prac, uzyskanymi przez autora i przedstawionymi w niniejszej dysertacji są:

- Budowa nowego interdyscyplinarnego stanowiska pomiarowego do badań nad wyładowaniami elektrycznymi pozwalającymi na równoległe pomiary innych zjawisk w zależności od zastosowanego detektora.
- Opracowanie metodologii wykonywania pomiarów w tym określenie czynników mogących mieć wpływ na uzyskane dane

- Wykonanie pomiarów detekcji promieniowania jonizującego generowanego przez wyładowania elektryczne oraz zmierzenie energii zjawiska
- Zbadanie wpływu środowiska, w którym wykonuje się pomiar na otrzymywane wyniki oraz zbadanie wpływu czynników zewnętrznych na uzyskiwane wyniki tj. zależność odległości między elektrodami, kształt elektrod, odległość między detektorem promieniowania, a elektrodą o niższym potencjale i wprowadzanie pęcherzyków gazów pomiędzy elektrody w środowisku oleju mineralnego
- Wykonanie opracowania i analizy uzyskanych danych pomiarowych

Na podstawie wyników analizy widm i spektrów otrzymanych w czasie badań potwierdzono, że zarówno wyładowania zupełne i w mniejszym stopniu niezupełne generują powstawanie wysokoenergetycznego promieniowania jonizującego, które może być istotnym składnikiem bilansu energetycznego zjawiska wyładowania elektrycznego.

Nieprzebadanymi w niniejszej dysertacji zagadnieniami są wpływ materiału, z którego zrobione są elektrody oraz jakie energie można uzyskać w trakcie wyładowań w innych środowiskach izolacyjnych choćby w innych gazach czy płynach, które z powodzeniem stosuje się, jako izolacje elektryczne w urządzeniach elektroenergetycznych. Ciekawym badaniem byłoby sprawdzenie wpływu transparentności płynu na rejestrowane dane np. płynu na bazie estrów w porównaniu do wyników uzyskanych dla oleju mineralnego lub też np. w gazie SF₆ i porównać wyniki z powietrzem jak zmiana składu pierwiastkowego wpływa na efektywność generowania promieniowania.

10. Literatura

- [1] Abderrazzaq M.H. and Abu Jalgif A.M., “Characterizing of corona rings applied to composite insulators,” *Electric Power Systems Research*, vol. 95, pp. 121–127, Feb. 2013.
- [2] Adili S. and Franck C., “Partial discharges characterization in spherical voids using ultra-short x-ray pulses,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 2, pp. 791–799, 2014.
- [3] Adili S.; Franck C.M.; Sert S.B.; and Herrmann L.G., “Pulsed x-ray induced partial discharge: Phase and time-resolved measurements,” *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, pp. 32–35, 2011.
- [4] Adili S.; Herrmann L.; and Franck C.M., “Investigating the inception mechanism of pulsed X-ray triggered partial discharges by time resolved measurements,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 5, pp. 1780–1788, 2013.
- [5] Adili S.; Herrmann L.G.; and Franck C.M., “Time resolved measurements of x-ray induced partial discharges,” *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 125–128, 2012.
- [6] Ahmed S.N., *Physics and Engineering of Radiation Detection*. AP, 2015.
- [7] Arabshahi S.; Dwyer J.R.; Cramer E.S.; Grove J.E.; Gwon C.; Hill J.D.; Jordan D.M.; Lucia R.J.; Vodopyyanov I.B.; Uman M.A.; and Rassoul H.K., “The energy spectrum of X-rays from rocket-triggered lightning,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120, no. 20, pp. 10,951–10,963, Oct. 2015.
- [8] Atkins P.W., “Chemia Fizyczna.” Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, pp. 486–489, 2001.
- [9] Bajwa A.A.; Habib S.; and Kamran M., “An investigation into partial discharge pulse extraction methods,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 964–982, 2015.
- [10] Boczar T.; Frącz P.; and Zmarzły D., “Analysis of the light radiation spectra emitted by electrical discharges in insulation oil,” *Physics and Chemistry of Solid State*, vol. 4, no. 4, pp. 729–736, 2003.
- [11] Boczar T., “Identification of a specific type of PD from acoustic emission frequency spectra,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 8, no. 4, pp. 598–606, 2001.
- [12] Boczar T.; Borucki S.; Cichoń A.; and Zmarzły D., “Application possibilities of artificial neural networks for recognizing partial discharges measured by the acoustic emission method,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 1, pp. 214–223, 2009.
- [13] Boczar T. and Zmarzły D., “Optical spectral diagnostics of electrical discharges in oil,” *IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005.*, pp. 99–101, 2005.
- [14] Boczar T. and Zmarzły D., “Analysis of the acoustic emission pulses generated by partial

- electrical discharges,” *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 45, no. 7, pp. 488–492, 2003.
- [15] Boczar T. and Zmarzly D., “Optical spectra of surface discharges in oil,” in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2006, vol. 13, no. 3, pp. 632–639.
- [16] Casals-Torrens P.; González-Parada A.; and Bosch-Tous R., “Online PD detection on high voltage underground power cables by acoustic emission,” *Procedia Engineering*, vol. 35, pp. 22–30, 2012.
- [17] Cichon A.; Boczar T.; Fracz P.; and Zmarzly D., “Detection of defects in on-load tap-changers using acoustic emission method,” in *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2012, pp. 184–188.
- [18] Cleary G.P. and Judd M.D., “UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil,” *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -*, vol. 153, no. 2, pp. 47–54, 2006.
- [19] Coenen S.; Tenbohlen S.; and Markalous S.M., “Detection of Partial Discharges in Power Transformers using UHF PD Measurements and Acoustic Measurements,” *Hightvolt-Kolloquium*, 2007.
- [20] Coenen S.; Tenbohlen S.; Markalous S.M.; and Strehl T., “Attenuation of UHF signals regarding the sensitivity verification for UHF PD measurements on power transformers,” in *Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2008*, 2007, pp. 1036–1039.
- [21] Coenen S.; Tenbohlen S.; Markalous S.M.; and Strehl T., “Sensitivity of UHF PD measurements in power transformers,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1553–1558, 2008.
- [22] Coenen S.; Kornhuber S.; Müller a; and Beltle M., “Uhf and Acoustic Partial Discharge Localisation in Power Trasformers,” *XVI International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011*, pp. D-015, 1–6, 2011.
- [23] Coenen S. and Tenbohlen S., “Location of PD sources in power transformers by UHF and acoustic measurements,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 6, pp. 1934–1940, 2012.
- [24] Cselkó R. and Berta I., “Challenges of partial discharge diagnostics of low-voltage cables,” *Journal of Electrostatics*, vol. 71, no. 3, pp. 558–563, Jun. 2013.
- [25] Czerwosz E.; Vouagner D.; Champagnon B.; Wronka H.; Dluzewski P.; and Girardeau-Montaut J.P., “Photoelectric properties of nanostructured carbonaceous films containing Ni-C nanocrystals investigated by picosecond laser-induced photoelectric charge emission,” *Diamond and Related Materials*, vol. 13, no. 4–8, pp. 1437–1441, Apr. 2004.
- [26] Danouj B.; Tahan S.A.; and David E., “Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection,” *Measurement*, vol. 46, no. 1, pp. 660–666, Jan. 2013.

- [27] Derenzo S.; Bizarri G.; Borade R.; Bourret-Courchesne E.; Boutchko R.; Canning A.; Chaudhry A.; Eagleman Y.; Gundiah G.; Hanrahan S.; Janecek M.; and Weber M., “New scintillators discovered by high-throughput screening,” in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, vol. 652, no. 1, pp. 247–250.
- [28] Deshpande A.S.; Mangalvedekar H.A.; and Cheeran A.N., “Partial discharge analysis using energy patterns,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 184–195, Dec. 2013.
- [29] van Deursen A. ~P.; Kochkin P.; Nguyen V.; and Ebert U., “On the origin of hard X-rays in the growth of meter long sparks,” *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2012.
- [30] Doke T.; Shibamura E.; Kubota S.; and Terasawa K., “Maximum scintillation yields in NaI(Tl) and CsI(Tl) crystals estimated from the scintillation model for liquid rare gases,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 266, no. 23, pp. 5063–5066, 2008.
- [31] Dwyer J.R., “Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, no. D10, p. D10103, May 2008.
- [32] Dwyer J.R., “X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning,” *Geophysical Research Letters*, vol. 32, no. 1, p. L01803, 2005.
- [33] Dwyer J.R.; Rassoul H.K.; Al-Dayeh M.; Caraway L.; Wright B.; Chrest A.; Uman M.A.; Rakov V.A.; Rambo K.J.; Jordan D.M.; Jerauld J.; and Smyth C., “Measurements of x-ray emission from rocket-triggered lightning,” *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 5, p. n/a–n/a, Mar. 2004.
- [34] Dwyer J.R.; Schaal M.M.; Cramer E.; Arabshahi S.; Liu N.; Rassoul H.K.; Hill J.D.; Jordan D.M.; and Uman M.A., “Observation of a gamma-ray flash at ground level in association with a cloud-to-ground lightning return stroke,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 117, no. A10, p. n/a–n/a, Oct. 2012.
- [35] Dwyer J.R.; Schaal M.; Rassoul H.K.; Uman M.A.; Jordan D.M.; and Hill D., “High-speed X-ray images of triggered lightning dart leaders,” *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 116, no. 20, pp. 1–10, 2011.
- [36] Dwyer J.R.; Uman M.A.; Rassoul H.K.; Al-dayeh M.; Caraway L.; Jerauld J.; Rakov V.A.; Jordan D.M.; Rambo K.J.; Corbin V.; and Wright B., “Energetic Radiation Produced During Rocket-Triggered Lightning,” *Science*, vol. 299, no. January, pp. 694–697, 2003.
- [37] Dyson N.A., “Promieniowanie rentgenowskie w fizyce atomowej i jądrowej,” *Wydawnictwo Naukowe PWN*, p. 1978, 1978.
- [38] Farag A.S.; Shewhdi M.H.; Jin X.; Wang C.; Cheng T.C.; Dong X.; Gao S.; Jing W.; and Wang Z., “On-line partial discharge calibration and monitoring for power transformers,” *Electric Power Systems Research*, vol. 50, no. 1, pp. 47–54, 1999.

- [39] Frącz P.; Boczar T.; Zmarzły D.; and Szczyrba T., “Analysis of optical radiation generated by electrical discharges on support insulator,” in *Acta Physica Polonica A*, 2013, vol. 124, no. 3, pp. 413–416.
- [40] Fuse N.; Ohki Y.; Kozako M.; and Tanaka T., “Possible mechanisms of superior resistance of polyamide nanocomposites to partial discharges and plasmas,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 1, pp. 161–169, 2008.
- [41] Gacek Z.; Szadkowski M.; Malitowski G.; Witos F.; and Olszewska A., “Anusual application of partial discharges to diagnose of high voltage power transformers,” *Acta Physica Polonica A*, vol. 120, no. 4, pp. 609–615, 2011.
- [42] Gao W.; Ding D.; Liu W.; and Huang X., “Investigation of the evaluation of the PD severity and verification of the sensitivity of partial-discharge detection using the UHF method in GIS,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 38–47, 2014.
- [43] Hekmati A., “A novel acoustic method of partial discharge allocation considering structure-borne waves,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 77, pp. 250–255, May 2016.
- [44] Howells E. and Norton E.T., “Location of Partial Discharge Sites in On-Line Transformers,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 1, pp. 158–162, 1981.
- [45] Iliev P.; Le Thuc P.; Luxey C.; and Staraj R., “Antenna design method for RFID UHF tags,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems*, 2007, pp. 562–565.
- [46] Jacosalem E.P.; Iba S.; Nakajima N.; Ono H.; Sanchez A.L.C.; Bacala A.M.; and Miyata H., “Systematic studies of small scintillators for new sampling calorimeter,” in *Pramana - Journal of Physics*, 2007, vol. 69, no. 6, pp. 1051–1056.
- [47] Judd M.D.; Farish O.; and Hampton B.F., “The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 3, no. 2, pp. 213–228, 1996.
- [48] Karmakar S.; Roy N.K.; and Kumbhakar P., “Monitoring of high voltage power transformer using direct optical partial discharge detection technique,” *Journal of Optics*, vol. 38, no. 4, pp. 207–215, 2009.
- [49] Katagiri M.; Sakasai K.; Matsubayashi M.; Nakamura T.; Kondo Y.; Chujo Y.; Nanto H.; and Kojima T., “Scintillation materials for neutron imaging detectors,” in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2004, vol. 529, no. 1–3 SPEC. ISS., pp. 274–279.
- [50] Koch M. and Kruger M., “A new method for on-line monitoring of bushings and partial discharges of power transformers,” *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, vol. 59, no. September, pp. 1205–1208, 2012.
- [51] Kochkin P.O.; van Deursen A.P.J.; and Ebert U., “Experimental study on hard x-rays emitted

- from metre-scale negative discharges in air,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 48, no. 2, p. 25205, 2015.
- [52] Kochkin P.O.; Nguyen C. V; van Deursen a P.J.; and Ebert U., “Experimental study of hard x-rays emitted from metre-scale positive discharges in air,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 45, no. 42, p. 425202, 2012.
- [53] Kochkin P.; van Deursen A.P.J.; de Boer A.; Bardet M.; and Boissin J.-F., “In-flight measurements of energetic radiation from lightning and thunderclouds,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 48, no. 42, p. 425202, 2015.
- [54] Kochkin P.O.; van Deursen a P.J.; Ebert U.; Deursen A. Van; and Ebert U., “Experimental study of the spatio-temporal development of metre-scale negative discharge in air,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 47, no. 14, p. 145203, 2014.
- [55] Köhn C.; Ebert U.; and Mangiarotti A., “The importance of electron–electron bremsstrahlung for terrestrial gamma-ray flashes, electron beams and electron–positron beams,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 47, no. 25, p. 252001, 2014.
- [56] Köhn C. and Ebert U., “Angular distribution of Bremsstrahlung photons and of positrons for calculations of terrestrial gamma-ray flashes and positron beams,” *Atmospheric Research*, vol. 135–136, pp. 432–465, 2014.
- [57] Koperundevi G.; Goyal M.K.; Das S.; Roy N.K.; and Sarathi R., “Classification of incipient discharges in transformer insulation using acoustic emission signatures,” in *Proceedings of the 2010 Annual IEEE India Conference: Green Energy, Computing and Communication, INDICON 2010*, 2010.
- [58] Kumar A. and Waker A.J., “An experimental study of the relative response of plastic scintillators to photons and beta particles,” *Radiation Measurements*, vol. 47, no. 10, pp. 930–935, Oct. 2012.
- [59] Lopez-Roldan J.; Tang T.; and Gaskin M., “Optimisation of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1634–1639, 2008.
- [60] Majidi M. and Oskuoee M., “Improving pattern recognition accuracy of partial discharges by new data preprocessing methods,” *Electric Power Systems Research*, vol. 119, pp. 100–110, Feb. 2015.
- [61] Malinowski G.; Moranda H.; and Siodła K., “Wyładowania niezupełne w estrze syntetycznym w zależności od temperatury,” *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 10, pp. 68–70, 2014.
- [62] Mann W.B. and Garfinkel S.B., “Promieniotwórczość i jej badanie.” Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1968.
- [63] March V. and Montany J., “Influence of the voltage-time derivative in X-ray emission from laboratory sparks,” *Geophysical Research Letters*, vol. 37, no. 19, pp. 4–7, 2010.
- [64] March V. and Montanyá J., “X-rays from laboratory sparks in air: The role of the cathode in the production of runaway electrons,” *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 4, pp. 1–5, 2011.

- [65] Morishita Y.; Yamamoto S.; Izaki K.; Kaneko J.H.; Toui K.; Tsubota Y.; and Higuchi M., “Performance comparison of scintillators for alpha particle detectors,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 764, pp. 383–386, 2014.
- [66] Muchin K.N., “Doświadczalna fizyka jądrowa 1. Fizyka jądra atomowego.” Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1978.
- [67] Muchin K.N., “Doświadczalna fizyka jądrowa 2. Fizyka cząstek elementarnych.” Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1978.
- [68] Muslim J.; Susilo A.; Nishigouchi K.; Arief Y.Z.; Khayam U.; Kozako M.; and Hikita M., “Improvement of Bowtie UHF Antenna Model for Detecting PD in GIS,” *Procedia Technology*, vol. 11, pp. 227–234, 2013.
- [69] Nguyen C. V.; van Deursen A.P.J.; and Ebert U., “Multiple x-ray bursts from long discharges in air,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, no. 23, p. 234012, 2008.
- [70] Nikitin P. V.; Rao K.V.S.; Martinez R.; and Lam S.F., “Sensitivity and Impedance Measurements of UHF RFID Chips,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 5, pp. 1297–1302, 2009.
- [71] Novikov G.K.; Smirnov A.I.; and Fedchishin V. V., “Detection of x-ray radiation of partial discharges in polymeric cable insulation,” *Russian Electrical Engineering*, vol. 80, no. 11, pp. 617–619, 2009.
- [72] Oldenberg O. and Rasmussen N.C., “Fizyka współczesna.” Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1970.
- [73] Ono M.; Matsuyama Y.; Otaka N.; Yamagiwa T.; and Kato T., “Experience of GIS condition diagnosis using partial discharge monitoring by UHF method,” in *Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2008*, 2007, pp. 1108–1110.
- [74] Orear J., “Fizyka T.2.” Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1993.
- [75] Ostgaard N.; Carlson B.E.; Grondahl O.; Kochkin P.; Nisi R.; and Gjesteland T., “Search for X-rays and relativistic electrons in laboratory discharge experiments,” *Presented at the American Geophysical Union Fall Meeting*, vol. 16, p. 6023, 2014.
- [76] Paul J.; Hueglin C.; Burtscher H.; Siegmann K.; and Siegmann H.C., “Photoemission detecting the melting point of small aerosol particles,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 27, pp. S579–S580, Sep. 1996.
- [77] Piccin R.; Mor A.; Morshuis P.; Girodet A.; and Smit J., “Partial discharge analysis of gas insulated systems at high voltage AC and DC,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 1, pp. 218–228, 2015.
- [78] Qi B.; Li C.; Hao Z.; Geng B.; Xu D.; Liu S.; and Deng C., “Partial discharge detection for GIS: A comparison between UHF and acoustic methods,” in *Conference Record of IEEE International*

Symposium on Electrical Insulation, 2010.

- [79] Rahman M.; Cooray V.; Ahmad N.A.; Nyberg J.; Rakov V.A.; and Sharma S., “X rays from 80-cm long sparks in air,” *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no. 6, pp. 2–5, 2008.
- [80] Resnick R. and Halliday D., “Fizyka T.2.” Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1984.
- [81] Rooh G.; Kim H.J.; Park H.; Kim S.; and Jiang H., “Cerium-Doped Scintillator for X-Ray and -Ray Detection,” vol. 61, no. 1, pp. 397–401, 2014.
- [82] Rostaminia R.; Saniei M.; Vakilian M.; and Mortazavi S.S., “Evaluation of transformer core contribution to partial discharge electromagnetic waves propagation,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 40–48, Dec. 2016.
- [83] Różga P., “Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 90, no. 1, pp. 245–247, 2014.
- [84] Sarathi R. and Koperundevi G., “Understanding the Discharge Activities in Transformer Oil under AC and DC Voltage Adopting UHF Technique,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 3, pp. 878–885, 2008.
- [85] Sarathi R.; Giridhar A. V.; Mani A.; and Sethupathi K., “Investigation of partial discharge activity of conducting particles in liquid nitrogen under DC voltages using UHF technique,” in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 655–662.
- [86] Sarathi R. and Koperundevi G., “UHF technique for identification of partial discharge in a composite insulation under AC and DC voltages,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1724–1730, 2008.
- [87] Sarathi R.; Reid A.J.; and Judd M.D., “Partial discharge study in transformer oil due to particle movement under DC voltage using the UHF technique,” *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 11, pp. 1819–1825, 2008.
- [88] Sarathi R. and Umamaheswari R., “Understanding the partial discharge activity of conducting particles in GIS under DC voltages using the UHF technique,” *European Transactions on Electrical Power*, vol. 20, no. 5, pp. 591–599, 2010.
- [89] Sarathi R. and Umamaheswari R., “Understanding the partial discharge activity generated due to particle movement in a composite insulation under AC voltages,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 48, pp. 1–9, Jun. 2013.
- [90] Sarathi R.; Singh P.D.; and Danikas M.G., “Characterization of partial discharges in transformer oil insulation under AC and DC voltage using acoustic emission technique,” *Journal of Electrical Engineering*, vol. 58, no. 2, pp. 91–97, 2007.
- [91] Sawieliew I.W., “Wykłady z Fizyki T.3.” Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1994.
- [92] Schaal M.M.; Dwyer J.R.; Arabshahi S.; Cramer E.S.; Lucia R.J.; Liu N.Y.; Rassoul H.K.; Smith D.M.; Matten J.W.; Reid A.G.; Hill J.D.; Jordan D.M.; and Uman M.A., “The structure of X-ray emissions from triggered lightning leaders measured by a pinhole-type X-ray camera,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 119, no. 2, pp. 982–1002, Jan. 2014.

- [93] Schultz T.; Pfeiffer M.; and Franck C.M., “Optical investigation methods for determining the impact of rain drops on HVDC corona,” *Journal of Electrostatics*, vol. 77, pp. 13–20, Oct. 2015.
- [94] Shirakawa Y., “Developments of directional detectors with NaI(Tl)/BGO scintillators,” in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, vol. 213, pp. 255–259.
- [95] Siebler D.; Rohwetter P.; Brusenbach R.; and Plath R., “Optical-only Detection of Partial Discharge with Fluorescent Polymer Optical Fiber Sensors,” *Procedia Engineering*, vol. 120, pp. 845–848, 2015.
- [96] Skrzypczak E. and Szepliński Z., “Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych,” pp. 23, 37–44, 2002.
- [97] Smith D.M.; Dwyer J.R.; Hazelton B.J.; Grefenstette B.W.; Martinez-McKinney G.F.M.; Zhang Z.Y.; Lowell A.W.; Kelley N.A.; Splitt M.E.; Lazarus S.M.; Ulrich W.; Schaal M.; Saleh Z.H.; Cramer E.; Rassoul H.; Cummer S.A.; Lu G.; Shao X.-M.; Ho C.; Hamlin T.; Blakeslee R.J.; and Heckman S., “A terrestrial gamma ray flash observed from an aircraft,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, no. D20, p. D20124, Oct. 2011.
- [98] Stefaan T., *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*. 2010.
- [99] Strzałkowski A., “Wstęp do fizyki jądra atomowego.” Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, 1969.
- [100] Su M.-S.; Chia C.-C.; Chen C.-Y.; and Chen J.-F., “Classification of partial discharge events in GILBS using probabilistic neural networks and the fuzzy c-means clustering approach,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, pp. 173–179, Oct. 2014.
- [101] Szczeniowski S., “Fizyka doświadczalna.” Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, 1967.
- [102] Szmechta M.; Boczar T.; Zmarzły D.; and Aksamit P., “Acoustic emission measurements of ultrasound induced cavitation bubbles in aged insulating oils,” in *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010.
- [103] Średniawa B., “Mechanika kwantowa.” Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1988.
- [104] Tang B.; Wu Y.; Li H.; Sun Y.; Huo H.; Liu B.; Tang K.; Yin W.; and Chao C., “The physics analysis and experiment study of zinc sulphide scintillator for fast neutron radiography,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 729, pp. 327–333, 2013.
- [105] Tavernier S., *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*. 2010.
- [106] Tehlar D.; Riechert U.; Behrmann G.; Schraudolph M.; Herrmann L.G.; and Pancheshnyi S., “Pulsed X-ray Induced Partial Discharge Diagnostics for Routine Testing of Solid GIS Insulators,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 6, pp. 2173–2178, 2013.
- [107] Tenbohlen S.; Pfeffer A.; and Coenen S., “On-site experiences with multi-terminal IEC PD measurements, UHF PD measurements and acoustic PD localisation,” in *Conference Record of*

IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2010.

- [108] Truong L.H. and Lewin P.L., “Phase resolved analysis of partial discharges in liquid nitrogen under AC voltages,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 6, pp. 2179–2187, 2013.
- [109] Urbaniec I. and Frącz P., “Application of UV camera for PD detection on long rod HV insulator,” *Measurement Automation Monitoring*, vol. 61, no. 03, pp. 64–67, 2015.
- [110] Vouagner D. and Girardeau-Montaut J.P., “Picosecond laser-induced ultrashort electron emission from carbon-based photocathodes,” *Thin Solid Films*, vol. 453–454, no. April 2004, pp. 22–26, 2004.
- [111] Wang K.; Tong X.; and Zhu X., “Transformer partial discharge monitoring based on optical fiber sensing,” *Photonic Sensors*, vol. 4, no. 2, pp. 137–141, 2014.
- [112] Wang X.; Kiiza R.C.; Niasar M.G.; and Edin H., “Surface charge dynamics studied by the temporal evolution of the corona charging current,” *Journal of Electrostatics*, vol. 76, pp. 222–230, Aug. 2015.
- [113] Watanabe M.; Katsumata M.; Ono H.; Suzuki T.; Miyata H.; Itoh Y.; Ishida K.; Tamura M.; and Yamaguchi Y., “First performance test of newly developed plastic scintillator for radiation detection,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 770, pp. 197–202, 2015.
- [114] Wei W.; Chengrong L.; Yitao J.; Guohua C.; and Zhiguo T., “The research on PD detection for C-GIS by using UHF method,” in *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, 2008, pp. 425–426.
- [115] Witos F. and Gacek Z., “Application of the joint electro-acoustic method for partial discharge investigations within a power transformer,” *European Physical Journal: Special Topics*, vol. 154, no. 1, pp. 239–247, 2008.
- [116] Witos F. and Gacek Z., “Properties of acoustic emission signals coming from partial discharges caused by modeled sources immersed in transformer oil,” *Acta Physica Polonica A*, vol. 116, no. 3, pp. 422–427, 2009.
- [117] Wotzka D.; Boczar T.; and Zmarzly D., “Analysis of Acoustic Wave Propagation in a Power Transformer Model,” *Acta Physica Polonica A - Optical and Acoustical Methods in Science and Technology*, vol. 116, no. 3, pp. 428–431, 2009.
- [118] Wotzka D.; Cichoń A.; and Boczar T., “Modeling and Experimental Verification of Ultrasound Transmission in Electro Insulation Oil,” *Archives of Acoustics*, vol. 37, no. 1, pp. 19–22, 2012.
- [119] Zhang S.; Zheng X.; Zhang J.; Cao H.; and Zhang X., “Study of GIS partial discharge on-line monitoring using UHF method,” in *Proceedings - International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE 2010*, 2010, pp. 4262–4265.
- [120] Zhang X.; Gockenbach E.; Liu Z.; Chen H.; and Yang L., “Reliability estimation of high voltage SF6 circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data,” *Electric Power Systems*

Research, vol. 103, pp. 105–113, Oct. 2013.

- [121] Zhang X.; Yang B.; Liu W.; and Zhang J., “Detection of Partial Discharge in SF₆ Decomposition Gas Based on Modified Carbon Nanotubes Sensors,” *Procedia Engineering*, vol. 29, pp. 4107–4111, 2012.