



Politechnika Opolska
Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Mgr inż. Ireneusz Urbaniec

**Widma emisyjne wyładowań elektrycznych
występujących na powierzchniach
dielektryków ceramicznych**

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

Promotor: Dr hab. inż. Paweł Frącz, prof. PO

Opole, 2015

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

*Przede wszystkim mojemu Promotorowi
Panu dr hab. inż. Pawłowi Frączowi, prof. PO
za wszelką pomoc udzieloną w czasie dotychczasowej
współpracy, a zwłaszcza za cenne uwagi merytoryczne.*

*Pragnę podziękować też wszystkim pracownikom
Instytutu Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej
Politechniki Opolskiej za okazaną pomoc i życzliwość,
której doświadczałem częstokroć.*

*Szczególne podziękowania składam mojej żonie Annie
oraz rodzinie za cenne wsparcie i słowa otuchy.*

Autor

Spis treści

str.

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	5
1. Wprowadzenie	6
2. Cel, zakres, teza pracy	8
3. Wyładowania niezupełne występujące w dielektrykach ceramicznych	8
3.1. Ogólna charakterystyka ceramiki izolacyjnej	8
3.2. Klasyfikacja izolatorów elektrotechnicznych	10
3.3. Klasyfikacja i fizyka zjawiska WNZ	13
3.4. Literaturowy przegląd zagadnienia	15
4. Pomiar widm optycznych emitowanych przez wyładowania niezupełne	25
4.1. Metrologiczne możliwości detekcji i pomiarów widm emisyjnych	25
4.2. Charakterystyka układu probierczego wysokiego napięcia	28
4.3. Dobór do badań dielektryków i układów izolacyjnych	29
4.4. Metrologiczna charakterystyka kamery UV i spektrofotometru, wykorzystywanych do detekcji i pomiarów widm optycznych	31
4.5. Zakres przeprowadzonych pomiarów	35
4.6. Numeryczne metody opracowania wyników pomiarów	38
4.6.1. Analizy dotyczące metody optycznej w wykorzystaniu kamery UV	38
4.6.2. Analizy dotyczące metody optycznej w wykorzystaniu spektrofotometru	42
5. Wyniki pomiarów emisji świetlnej zarejestrowanej kamerą w zakresie UV	43
5.1. Natężenie emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni walca izolacyjnego z porcelany wypełnionego powietrzem przy różnych odległościach między elektrodami	43
5.1.1. Odległość między elektrodami 3 cm	43
5.1.2. Odległość między elektrodami 5 cm	46
5.1.3. Odległość między elektrodami 7 cm	48
5.1.4. Odległość między elektrodami 9 cm	50
5.1.5. Odległość między elektrodami 11 cm	52
5.2. Natężenie emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni walca izolacyjnego z porcelany wypełnionego dielektrykiem kwar- cowym przy różnych odległościach między elektrodami	54
5.2.1. Odległość między elektrodami 3 cm	54
5.2.2. Odległość między elektrodami 5 cm	56
5.3. Natężenie emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego izolatora kołpakowego typu LK	58
5.4. Natężenie emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego izolatora długopniowego typu LS	60

	str.
6. Wyniki pomiarów widm emisyjnych zarejestrowanych spektrofotometrem	62
6.1. Intensywność emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni walca izolacyjnego z porcelany wypełnionego kwarcem przy różnych napięciach i różnych odległościach między elektrodami	62
6.1.1. Odległość między elektrodami 3 cm	62
6.1.2. Odległość między elektrodami 5 cm	63
6.1.3. Odległość między elektrodami 7 cm	64
6.1.4. Odległość między elektrodami 9 cm	65
6.1.5. Odległość między elektrodami 11 cm	66
6.2. Intensywność emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego izolatora kołpakowego typu LK	67
6.3. Intensywność emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego izolatora długopniowego typu LS.....	68
7. Numeryczne opracowanie wyników uzyskanych metodą UV, ich analiza i interpretacja	69
7.1. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni walca izolacyjnego wykonanego z porcelany, z powietrzem w środku	69
7.1.1. Odległość między elektrodami 3 cm	69
7.1.2. Odległości między elektrodami 5 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm	75
7.2. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem	75
7.2.1. Odległość między elektrodami 3 cm	75
7.2.2. Odległość między elektrodami 5 cm	81
7.3. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego typu LK	81
7.4. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego typu LS	87
7.5. Zestawienia porównawcze wyników uzyskanych z przeprowadzonych analiz zarejestrowanych metodą optyczną z wykorzystaniem kamery UV	92
7.6. Najważniejsze konkluzje interpretacyjne	96
8. Numeryczne opracowanie wyników uzyskanych metoda spektrofotometrii	99
8.1. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, odległość między elektrodami 3 cm	99
8.1.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych	99
8.1.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa	100
8.1.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa	103
8.2. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, odległości między elektrodami 5 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm	106
8.3. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego typu LK	106
8.3.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych	106
8.3.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa	107
8.3.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa	110

	str.
8.4. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego typu LS	113
8.4.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych	113
8.4.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa	114
8.4.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa	117
8.5. Zestawienia porównawcze i najważniejsze konkluzje interpretacyjne wyników uzyskanych z przeprowadzonych analiz danych zarejestrowanych metodą optyczną z wykorzystaniem spektrofotometru optycznego	120
9. Podsumowanie	125
LITERATURA	129
 ZAŁĄCZNIK NR 1	
Wyniki analizy widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem	1-19
 ZAŁĄCZNIK NR 2	
Wyniki analizy widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem	1-5
 ZAŁĄCZNIK NR 3	
Wyniki analizy widm emisyjnych wyładowań zarejestrowanych metodą spektrofotometrii. Wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem	1-28
 ZAŁĄCZNIK NR 4	
Płyta CD zawierająca wersję elektroniczną pracy doktorskiej oraz zestawienie w postaci graficznej wszystkich uzyskanych wyników pomiarów i analiz.	

Spis oznaczeń i skrótów

- WNZ - wyładowanie niezupełne
GEV - *ang.* generalized extreme value, rodzaj funkcji matematycznej
MVUE - *ang.* minimum variance unbiased estimator, rodzaj algorytmu
SSE - *ang.* summed square of residuals value, suma kwadratów wartości resztkowych
R-square - współczynnik determinacji
 R^2 - współczynnik determinacji
Adj-R-square - *ang.* degree-of-freedom adjusted coefficient of determination, skorygowany współczynnik determinacji
RMSE - *ang.* root mean square error, błąd średniokwadratowy
MNK - metoda najmniejszych kwadratów
 ϵ_r - przenikalność dielektryczna
 $tg \delta$ - stratność dielektryczna
 λ - długość fali widma emisji świetlnej
 I - intensywność promieniowania emisji świetlnej
 L - liczba zliczeń
 μ - średnia arytmetyczna
 s - wariancja
 R^2 - współczynnik determinacji
 δ - norma reszt
 U_p - napięcie przebicia układu izolacyjnego
 U_0 i U_{01} - napięcie początkowe ulotu
EA - emisja akustyczna
UVA - promieniowanie nadfioletowe w zakresie A o długości fali $\lambda = 315-400$ nm
UVB - promieniowanie nadfioletowe w zakresie B o długości fali $\lambda = 280-315$ nm
UVC - promieniowanie nadfioletowe w zakresie C o długości fali $\lambda = 200-280$ nm

Oznaczenia badanych układów izolacyjnych

- WPP3 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony powietrzem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 3 cm
WPP5 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony powietrzem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 5 cm
WPP7 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony powietrzem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 7 cm
WPP9 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony powietrzem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 9 cm
WPP11 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony powietrzem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 11 cm
WPK3 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony kwarcem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 3 cm
WPK5 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony kwarcem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 5 cm
WPK7 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony kwarcem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 7 cm
WPK9 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony kwarcem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 9 cm
WPK11 - porcelanowy walec izolacyjny wypełniony kwarcem, z zamontowaną elektrodą HV w odległości 11 cm
LK - izolator kołpakowy wykonany z porcelany typu LK 250
LS - pojedynczy klosz porcelanowego izolatora długopniowego typu LS 75/21

1. Wprowadzenie

Tematyka dysertacji umiejscowiona jest w dyscyplinie Elektrotechnika w specjalności Technika Wysokich Napięć, a w szczególności dotyczy diagnostyki ceramicznych układów elektroizolacyjnych. Prowadzone w tym zakresie w kraju i na świecie prace badawczo-rozwojowe mają na celu optymalizację konstrukcji układów izolacyjnych urządzeń wysokiego napięcia, pogłębienie wiedzy o procesach degradacji elementów izolacji ceramicznej, metodach ich detekcji i rozwój nowych technologii, umożliwiających pracę urządzeń przy coraz wyższych napięciach. Problematyka badania układów izolacyjnych stosowanych w urządzeniach elektroenergetycznych i liniach przesyłowych wysokiego napięcia dotyczy głównie prognozowania procesu degradacji materiałów dielektrycznych, a w szczególności pogarszania się ich właściwości izolacyjnych przez obniżenie wytrzymałości elektrycznej [73, 77, 124, 137, 151, 152]. Wieloczynnikowe narażenia eksploatacyjne skutkujące m.in. starzeniem się izolatorów, mają wpływ na prawidłowe działanie całego systemu elektroenergetycznego. Istotnym czynnikiem powodującym degradację materiału izolacyjnego są wyładowania niezupełne (WNZ). Mechanizmom powstawania, propagacji i eliminacji WNZ występujących w układach izolacyjnych różnej konstrukcji poświęcona jest obecnie szybko się rozwijająca dziedzina diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych [40-46, 48-50]. Zajmuje się ona m.in. rozwojem nowych i doskonaleniem istniejących metod detekcji i lokalizacji miejsc występowania WNZ oraz oceną stanu technicznego badanej izolacji, na podstawie parametrów sygnałów rejestrowanych różnymi metodami. Skutkami WNZ są między innymi straty mocy czynnej i uszkodzenia izolatorów oraz zakłócenia w pracy urządzeń telekomunikacyjnych. Ich wczesne wykrycie ogranicza wystąpienie kosztownych awarii i zmniejsza koszty napraw. Podejmowane prace mają na celu określenie charakterystycznych wskaźników opisujących proces postępowania deterioracji elementów izolacji, a w szczególności wskazanie wartości krytycznych, przy których może nastąpić jej całkowite i trwałe uszkodzenie. Jedno z ważniejszych zagadnień stanowi zapobieganie WNZ typu powierzchniowego występującym w izolacji gazowej, co wynika z faktu, że jej wytrzymałość elektryczna zależy w dużym stopniu od powierzchniowych właściwości dielektryka stałego.

Metody diagnostyczne dotyczące WNZ od kilkadziesiąt lat rozwijane są w laboratoriach Wysokich Napięć Instytutu Elektroenergetyki i Technologii Odnawialnych na Politechnice Opolskiej. Rozpatrywana problematyka obejmuje swym zakresem badania mechanizmów powstawania i propagacji WNZ, sposobów rozpoznawania i klasyfikacji

poszczególnych form WNZ, modelowanie i przetwarzanie rejestrowanych sygnałów z uwzględnieniem różnych grup urządzeń elektroenergetycznych [10-20, 60, 134-135]. Dysertacja jest elementem badań kontynuowanych obecnie w problematyce WNZ w Laboratorium Wysokich Napięć na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki Politechniki Opolskiej.

2. Cel, zakres, teza pracy

Naukowym celem pracy jest określenie widm emisyjnych wyładowań elektrycznych występujących na powierzchni izolacji porcelanowej z wykorzystaniem wysokoczułej kamery UV i spektrofotometru.

Technicznym celem pracy jest ocena początkowego napięcia wyładowań elektrycznych w oparciu o widma emisyjne z większą czułością niż było to dotychczas możliwe w oparciu o pomiar napięcia początkowego ulotu U_0 .

Praca ma charakter eksperymentalno – doświadczalny i obejmuje badania laboratoryjne i weryfikację uzyskanych wyników na obiektach technicznych.

W rozprawie przyjęto następującą tezę:

"Wyniki pomiarów widm emisyjnych, szczególnie w zakresie spektralnym 250 – 280 nm, generowanych przez wyładowania niezupełne występujące na powierzchniach dielektryków porcelanowych mogą być czułym i skutecznym wskaźnikiem określającym ich wytrzymałość powierzchniową".

W celu udowodnienia przyjętej tezy w rozprawie podjęto następujące zagadnienia:

- scharakteryzowano ceramikę izolacyjną,
- przedstawiono klasyfikację izolatorów elektrotechnicznych,
- omówiono fizykę zjawiska WNZ,
- przedstawiono metrologiczne możliwości detekcji i pomiarów widm emisyjnych
- scharakteryzowano układ pomiarowy i wykorzystane w badaniach dielektryki ceramiczne,
- przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów i analiz numerycznych emisji świetlnej z wykorzystaniem kamery UV i spektrofotometru,
- przedstawiono wyniki modelowania z wykorzystaniem równań matematycznych opisujących uzyskane zależności,
- zestawiono w sposób porównawczy uzyskane wyniki i sformułowano wnioski.

3. Wyładowania niezupełne występujące w dielektrykach

3.1. Ogólna charakterystyka ceramiki izolacyjnej

Ceramiki izolacyjne wytwarzane są z tlenków krzemu SiO_2 i glinu Al_2O_3 , tj. z kaolinu, skalenia i kwarcu, zwykle w proporcjach: 50%, 25%, 25%. Kaolin ułatwia formowanie produktów, skaień zmniejsza ich skurczliwość podczas suszenia, a kwarc jest topnikiem ułatwiającym spiekanie [26, 118].

Materiały ceramiczne nie podlegają procesom utleniania i nie wykazują właściwości metalicznych, chociaż wiele spośród nich ma budowę krystaliczną. Temperatura topnienia przekracza temperaturę topnienia metali. Materiały ceramiczne posiadają zróżnicowaną gęstość od $1,8 \text{ g/cm}^3$ (ceramika porowata) do $9,7 \text{ g/cm}^3$ (tlenek toru). Przewodność cieplna wynosi od 1,1 do $200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Najlepsze własności mechaniczne wykazują trójtlenek glinu oraz ceramika cyrkonowa. Ceramiki są odporne na zmiany temperatury rzędu $110\text{-}160 \text{ }^\circ\text{C}$. Zwykle są glazurowane co minimalizuje porowatość izolatora ceramicznego. Porowatość struktury ma negatywny wpływ na wytrzymałość mechaniczną. Rezystywność skrośna zależy głównie od składu chemicznego i mieści się w przedziale od 10^{11} do $10^{16} \Omega\cdot\text{cm}$ w warunkach normalnych. Największą rezystywność posiadają masy celsjanowe. Rezystywność powierzchniowa zawiera się w granicach od 10^{10} do $10^{12} \Omega$. Wytrzymałość dielektryczna zależy od mikrostruktury materiału, jego spoistości oraz rodzaju i kształtu występujących w nim porów. Przykładowo dla ceramiki celsjanowej zawiera się w przedziale od 10 do 15 kV/mm , a dla korundu od 30 do 40 kV/mm . Silnie niekorzystny wpływ na wytrzymałość elektryczną wywiera obecność porów otwartych, przez które dochodzi do przebiegów, zapoczątkowanych przez WNZ. Pory powodują również szybsze nasiąkanie materiału ceramicznego, co pogarsza jego właściwości dielektryczne. Wytrzymałość elektryczna maleje wraz ze wzrostem temperatury. Przenikalność elektryczna względna ceramiki waha się w szerokich granicach. Materiały ceramiczne o znacznej przenikalności elektrycznej wykazują własności ferroelektryczne. Ceramika charakteryzuje się wysoką odpornością chemiczną. Najlepszą odporność chemiczną wykazują tworzywa kwasoodporne, wykonane z glin ogniotrwałych z dodatkiem porcelany i kamionki, a najgorszą, wykazują tlenki krzemu, berylu i glinu. Poza pewnymi szczególnymi przypadkami, materiały ceramiczne nie wykazują oznak występowania procesu starzenia i zmęczenia mechanicznego. Ceramikę elektroizolacyjną dzieli się na następujące rodzaje: porcelana elektrotechniczna, kamionka, steatyt, ceramika kondensatorowa, ceramika o małym kącie stratności dielektrycznej $\text{tg}\delta$, ceramika elektrotermiczna. Do wyrobu izolatorów liniowych wysokiego i niskiego napięcia

oraz do wyrobu izolatorów wsporczych i przepustowych stacyjnych wykorzystuje się porcelanę elektrotechniczną. Produkowany z takiej porcelany jest różnego rodzaju osprzęt izolacyjny, np.: tulejki, rolki, korpusy, podstawy główki bezpieczników, oprawki żarówek itp. Według normy PN-86/E-06301 [<http://pzn.pkn.pl/kt/info/published/9000129711>, dostęp 08.2015r.] rozróżnia się cztery rodzaje porcelany do budowy izolatorów: rodzaj 110 - porcelana elektrotechniczna, rodzaj 112 - porcelana elektrotechniczna krystalitowa, rodzaj 120 - porcelana elektrotechniczna wysokoglinowa, rodzaj 130 - porcelana elektrotechniczna wysokoglinowa o dużej wytrzymałości. Wytrzymałość mechaniczna na zginanie porcelany 112 i 120 jest o 50% większa niż rodzaju 110, a porcelany 130 aż trzy razy większa. Do wyrobu masywnych i grubościennych elementów, np.: komory wyłączników małoolejowych wysokiego napięcia, korpusy przekładników małoolejowych napowietrznych izolatorów, stosuje się kamionkę. Pomimo swych nieco gorszych własności elektrycznych w porównaniu do porcelany elektrotechnicznej, to z uwagi na niższą cenę i bardzo dobre własności mechaniczne, kamionka jest często stosowana. Do produkcji izolatorów narażonych na duże naprężenia mechaniczne, np. izolatorów wysokiego napięcia do urządzeń radiowych, izolatorów liniowych długopniowych i drobnych elementów do grzejników elektrycznych stosowany jest steatyt, należący do grupy ceramiek konstrukcyjnych, którego głównym składnikiem jest krzemian magnezu $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}\cdot \text{H}_2\text{O}$ z dodatkiem glin plastycznych i skalenia. Ceramika kondensatorowa charakteryzuje się przenikalnością dielektryczną ϵ_r na poziomie 12-160, którą uzyskuje się przez domieszkowanie związkami tytanu. Ceramikę o małym kącie stratności dielektrycznej $\text{tg}\delta$, rzędu 3e^{-3} , zwaną również ceramiką radiotechniczną otrzymuje się przez zastąpienie w masie porcelanowej skalenia węglanem baru BaCO_3 . Stratności rzędu 6e^{-4} uzyskuje się przez zastąpienie kaolinu trudno topliwym korundem Al_2O_3 . Ceramika elektrotechniczna, do której zaliczamy: szamot, sylimanit, kordieryt i ceramikę cyrkonową, zawierającą tlenki cyrkonu i krzemu, jest odporna na działanie i zmiany wysokiej temperatury. Dobre właściwości posiada np. tlenek magnezu i szamot, z którego wykonuje się np. wykładziny elektrycznych pieców przemysłowych, płytki kuchenek elektrycznych oraz elementy izolacyjno-konstrukcyjne grzejników elektrycznych. Elementy konstrukcyjno-izolacyjne urządzeń elektrycznych pracujących w wysokich temperaturach, takich jak: części izolacyjne pieców, izolatory do samochodowych świec zapłonowych, wykonuje się z silimanitu. Natomiast z kordierytu, który jest materiałem odpornym na działanie łuku elektrycznego i na gwałtowne wahania temperaturowe, wykonuje się komory gaszeniowe wyłączników niskiego i średniego napięcia.

W elektrotechnice materiały ceramiczne stosowane są przede wszystkim do produkcji izolatorów w liniach wysokiego i niskiego napięcia, izolacji aparatów elektrycznych, izolacji w urządzeniach elektrotermicznych odpornych na działanie wysokich temperatur, izolacji w urządzeniach wysokiej częstotliwości, izolatorów kondensatorowych o dużej przenikalności dielektrycznej ϵ_r i małym współczynniku stratności dielektrycznej $tg \delta$.

3.2. Klasyfikacja izolatorów elektrotechnicznych

Izolatory elektroenergetyczne służą do izolowania przewodów oraz różnych elementów urządzeń elektrycznych i elektroenergetycznych znajdujących się pod napięciem w stosunku do ziemi lub innych punktów odniesienia [61-62, 67, 93]. Istnieje szereg norm zawierających wymagania, które powinny być spełnione przez układy izolacyjne w nowo budowanych instalacjach, przykładowo:

- PN-EN 60433:2001, definiuje ceramiczne izolatory do sieci prądu przemiennego linii napowietrznych o znamionowym napięciu powyżej 1 kV, metody badań i kryteria wyników,
- PN-EN 60383-1:2005, definiuje ceramiczne i szklane izolatory do sieci prądu przemiennego linii napowietrznych o znamionowym napięciu powyżej 1 kV, metody badań i kryteria wyników,
- PN-IEC 815:1998, podaje wytyczne doboru izolatorów do warunków zabrudzeniowych,
- PN-E-06303:1998, opisuje narażenie zabrudzeniowe izolacji napowietrznej i dobór izolatorów do warunków zabrudzeniowych,
- PN-IEC 60471:2006, definiuje wymiary elektroenergetycznych izolatorów wysokonapięciowych - złącz widlastych izolatorów liniowych wiszących,
- PN-EN 60672-3 (U):2002, podaje wymagania techniczne dla poszczególnych materiałów izolacyjnych ceramicznych i szklanych,
- PN-EN 12500:2002, dotyczy ochrony metali przed korozją i podaje ryzyka korozji w warunkach atmosferycznych,
- wykaz aktualny norm znajduje się pod adresem: <http://pzn.pkn.pl/kt/info/published/9000129711>, dostęp 08.2015r.

Podstawowym kryterium podziału izolatorów jest miejsce ich montażu w urządzeniu i w środowisku. Pod tym względem dokonuje się podziału na izolację wewnętrzną i izolację zewnętrzną. Izolacja wewnętrzna nie jest narażona na czynniki atmosferyczne, gdyż

zainstalowana jest w obudowie urządzenia. Izolacja zewnętrzna, która dzieli się na izolację wewnętrzną i izolację napowietrzną, zawsze wystawiona jest na działanie czynników atmosferycznych. Natomiast izolacja napowietrzna narażona jest dodatkowo na działanie deszczu, mgły, zabrudzeń, znacznych wahań temperatury, wiatru itp. Ze względu na zakres pracy rozróżnia się izolatory wysokonapięciowe (powyżej 1 kV) i niskonapięciowe (poniżej 1 kV). Izolatory niskonapięciowe stosowane są w liniach elektroenergetycznych (izolatory stojące, szpulowe i bezpiecznikowe) i w rozdzielniach oraz aparatach (izolatory przepustowe). Izolatory niskonapięciowe stosowane są często jako części izolacyjne elementów konstrukcyjnych urządzeń elektrycznych, takich jak: gniazda bezpiecznikowe, bezpieczniki, cokoły wyłączników, podstawki, oprawy lamp, tulejki itp. Izolatory wysokonapięciowe wykorzystuje się do oddzielania i mocowania przewodów, szyn i elementów urządzeń w układach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Z uwagi na ich równoczesną funkcję elementu konstrukcyjnego, izolatory te cechują się znaczną wytrzymałością mechaniczną. Pod względem wytrzymałości elektrycznej dzieli się je na izolatory przebijalne i nieprzebijalne. Izolatory przebijalne to takie, w których droga przebicia jest mniejsza od połowy drogi przeskoku. Natomiast w izolatorach nieprzebijalnych droga przebicia jest równa lub większa od połowy drogi przeskoku. Specjalną grupę stanowią izolatory przeciwbudzeniowe, które przeznaczone są do pracy w okręgach przemysłowych i nadmorskich.

Według normy E-02051 izolatory wysokonapięciowe dzieli się 5 grup: L- liniowe, S- stacyjne, P - aparatowe przepustowe, O - aparatowe osłony, R - aparatowe różne. Pod względem zastosowania konstrukcyjnego istnieje następujący podział: stojące, wsporcze, trakcyjne, wiszące kołpakowe, wiszące pniowe, przepustowe, transformatorowe, przekładnikowe, wyłącznikowe, kondensatorowe, rury bezpiecznikowe i inne.

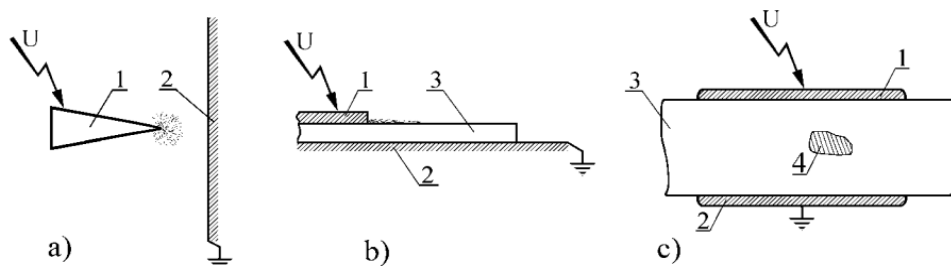
W czasie eksploatacji izolatory podlegają działaniom różnych czynników zewnętrznych, do których zalicza się: narażenia elektryczne, mechaniczne, ciepłe i atmosferyczne. Narażenia elektryczne pochodzą od napięcia roboczego i przepięć atmosferycznych oraz łączeniowych. W normalnych warunkach pracy, w trójfazowym układzie elektroenergetycznym, izolator znajduje się pod działaniem napięcia fazowego. Zagrożenie izolatorów w funkcji napięcia znamionowego zależy od jego konstrukcji. Dla napięć niższych przyjmuje się, że decydujące znaczenie mają wyładowania piorunowe. W miarę wzrostu napięcia sieciowego maleje udział zakłóceń burzowych natomiast wzrasta udział zakłóceń zabrudzeniowych. Wraz ze wzrostem napięcia rośnie zagrożenie pochodzące od przepięć łączeniowych. Produkowane izolatory powinny wytrzymywać bez przeskoków

i przebić większość przepięć łączeniowych i zwarciovych. W celu ochrony od przepięć atmosferycznych stosuje się środki ochrony odgromowej i przeciwłukowej. Narażenia zabrudzeniowe stanowią osobną problematykę, gdyż potencjalne zagrożenie awaryjne istnieje ciągle, a ujawnia się jedynie w niektórych okolicznościach. Takie narażenie polega na tym, że na izolator oddziałują jednocześnie zanieczyszczenia i wilgotność. Zagrożenie zabrudzeniowe zależy od natężenia i właściwości przewodnictwa elektrycznego opadających zanieczyszczeń i od zawartości niektórych gazów w otoczeniu izolatorów napowietrznych. Jako miarę narażenia zabrudzeniowego stosuje się wartość konduktywności powierzchniowej danego izolatora. Z uwagi na fakt, że wartość ta zależy od długości drogi upływu, drogę tę wraz z wartością najwyższego napięcia roboczego urządzenia przyjmuje się jako kryterium doboru zabrudzeniowego. Innym stosowanym kryterium jest charakterystyka zabrudzeniowa izolatora, dotycząca zależności pięćdziesięcioprocentowego napięcia przeskoku zabrudzeniowego od konduktywności powierzchniowej (norma PN-79/E-06303). W obowiązujących normach (PN-81/E-05001, PN-79/E-06303) narażenia elektryczne zostały uwzględnione przez przypisanie im wartości napięć probierczych w zależności od napięć znamionowych, które dany układ izolacyjny musi wytrzymać. Narażenia mechaniczne izolatorów dzieli się ze względu na źródło pochodzenia na: obciążenia elektrodynamiczne i obciążenia natury nieelektrycznej. Obciążenia mechaniczne wynikają z działania sił statycznych, udarowych i wibracyjnych. Zgodnie z normą PN-88/E-06313 obciążenia mechaniczne występujące w liniach napowietrznych dzieli się na: zewnętrzne (wiatrowe, oblodzeniowe, oblodzeniowo-wiatrowe), ciągłe (pochodzące od naciągu przewodów i masy elementów linii) i specjalne (obciążenia montażowe i zakłóceniove). Obciążenia elektrodynamiczne są największe przy dużych prądach zwarciovych i powodują obciążenia natury zginającej lub skręcającej, stąd są istotne dla izolatorów w stacjach rozdzielczych. Obciążenia natury rozciągającej (np. naciąg przewodów) decydują o doborze izolatorów liniowych. Innym rodzajem zagrożenia jest oddziaływanie ciepła wytwarzanego podczas łuku elektrycznego. Przykładowo prąd łuku o wartości 2,5 kA i czasie trwania 3,5 s powoduje trwałe uszkodzenie w postaci pęknięć lub stopienia porcelany. Nagłe zmiany temperatury powierzchni izolatora spowodowane nagrzewaniem słonecznym, ochłodzeniem przez grad lub zimny deszcz mogą powodować pęknięcie izolatora. Izolatory przepustowe narażone są na ciepło wytwarzane w jego wewnętrznej części na skutek strat dielektrycznych [83, 139, 141].

3.3. Klasyfikacja i fizyka zjawiska WNZ

Jednym z mechanizmów powodujących przebicie dielektryków stałych, obok mechanizmów elektrycznych, cieplnych i chemicznych są WNZ. Należy zaznaczyć, że rodzaj mechanizmu przebicia zależy w dużym stopniu od czasu przyłożenia napięcia. Przebicie dielektryku stałego na skutek oddziaływania wyładowań niezupełnych następuje, gdy w strukturze materiałowej istnieją rozwarstwienia, pęknięcia lub wtrącenie gazowe. Gazy cechują się mniejszą wytrzymałością elektryczną, stąd w przestrzeniach gazowych istnieje wyższe natężenie pola elektrycznego niż w dielektryku, co powoduje występowanie WNZ. Ich destruktywne oddziaływanie powodowane jest bombardowaniem ścianek wtrącin gazowych przez elektrony i jony, wzrostem temperatury w miejscu oddziaływania WNZ, oddziaływaniem chemicznym aktywnych gazów i związków powstałych w wyniku rozkładu chemicznego materiału dielektrycznego oraz reakcji ze składnikami atmosfery wtrąciny, promieniowaniem wysokoenergetycznym, ultrafioletowym i lokalnym spiętrzeniem pola elektrycznego wywołanym elektronami i jonami osiadającymi na ściankach dielektryku. Wszystkie te procesy prowadzą do powolnej utraty właściwości izolacyjnych w miejscu występowania WNZ, a w końcowym stadium do jego przebicia [8, 22, 81, 153, 157].

Podstawową cechą WNZ jest to, że z czasem przekształcają się one w zawierający elektrony plazmowy kanał przewodzący. WNZ powstają w układach izolacyjnych znajdujących się w nierównomiernym polu elektromagnetycznym, którego natężenie przekroczyło określoną wartość, zwaną progiem jonizacji. Pole takie pojawia się najczęściej na krawędziach i zaostreniach elektrod oraz w pęcherzykach gazowych obecnych w dielektryku stałym. W dielektrykach gazowych i ciekłych rozwijające się WNZ zwane są ulotem lub koroną (rys. 3.1a). Wyładowania ślizgowe lub powierzchniowe (rys. 3.1b) rozwijają się wzdłuż powierzchni dielektryka stałego, do którego przyłożona jest elektroda. Wyładowania występujące we wtrącinach gazowych zlokalizowanych wewnątrz materiału nazywane są wyładowaniami wewnętrznymi (rys. 3.1c).



Rys. 3.1 Formy WNZ występujących w różnych układach [45].

W dielektrykach idealnych, zbudowanych ze szkła czy porcelany, WNZ nie występują. Dielektryki, zbudowane z papieru, oleju czy żywicy, są bardziej narażone na rozwój WNZ, ponieważ w materiale organicznym podczas WNZ następują liczne przemiany fizykochemiczne powodujące jego degradację. Przykładowo WNZ ślizgowe powodują na powierzchni papieru bakelizowanego czarne żłobienia przekształcające się w półprzewodzące kanały. Papierowa izolacja poddana długotrwałej jonizacji powoduje wzrost lokalnych zwęglań, a w efekcie toruje drogę przebicia takiej izolacji. Innym przykładem jest ulot występujący na liniach energetycznych, który m.in. skutkuje wytwarzaniem ozonu O_3 i tlenków azotu. W połączeniu tlenków azotu z wilgocią powstają kwasy azotowy HNO_3 i azotawy HNO_2 , a te z kolei są szkodliwe dla kauczukowych i celulozowych izolatorów oraz dla metali.

Rozkład WNZ powierzchniowych jest zależny od rozkładu pola elektromagnetycznego. Materiał dielektryka powoduje dodatkową deformację pola, która uzależniona jest od przenikalności dielektrycznej, rezystancji powierzchniowej z uwzględnieniem ewentualnego zabrudzenia, ładunku powierzchniowego i od jakości połączenia elektrody z dielektrykiem. Natężenie pola zależy od kształtu elektrod, rodzaju (grubości) i właściwości elektrycznych materiału dielektrycznego oraz powietrza. Największe natężenie pola jest zlokalizowane w pobliżu elektrody uziemionej, jeśli rezystancja powierzchniowa jest duża, tj. gdy powierzchnia izolatora jest czysta. Obecność zabrudzenia i zawilgocenia powoduje zmniejszenie rezystancji powierzchniowej dielektryka stałego. W takiej sytuacji napięcie przeskoku zależy od rozkładu konduktywności powierzchniowej, która jest powiązana z intensywnością zabrudzenia, zawilgocenia i lokalizacji stref suchych. Zabrudzenie ma bezpośredni wpływ na zwielokrotnienie prądu upływu [8, 21, 22, 104, 140, 123]. Natomiast strefy suche powstają w miejscach o największej gęstości prądu upływu. W sytuacji gdy napięcie w takiej sferze przekroczy wartość krytyczną, powiązaną z wytrzymałością elektryczną powietrza, pojawiają się lokalne łuki elektryczne. Wyładowania powierzchniowe występujące na dielektrykach stałych dzieli się w zależności od własności, stanu powierzchni i rodzaju uwarstwienia na: wyładowania świetlące (nitkowe), występujące wzdłuż czystej powierzchni dielektryka stałego, uwarstwionego prawie równoległe z otaczającym go ośrodkiem, wyładowania ślizgowe, które mają miejsce wzdłuż czystej powierzchni dielektryka stałego, uwarstwionego ukośnie z otaczającym go ośrodkiem, wyładowania zabrudzeniowe, generowane wzdłuż powierzchni pokrytego półprzewodzącą zabrudzeniową powłoką dielektryka stałego o dowolnym ukształtowaniu względem elektrod, wyładowania pełne, mogące występować wzdłuż powierzchni dielektryka stałego o dowolnym

ukształtowaniu względem elektrod i zmieniającego swoje własności pod wpływem generowanych WNZ. WNZ typu powierzchniowego objawiają się poprzez emisję fal elektromagnetycznych w postaci ciepła, światła i fal radiowych, emisję fal akustycznych słyszalnych i ultradźwiękowych oraz emisję gazów: ozonu i tlenków azotu [6, 82, 88, 106-108, 142-144, 158-160]. Rodzaje i własności WNZ występujących w niejednorodnym polu elektromagnetycznym w środowisku gazowym przedstawiono w sposób szczegółowy między innymi w pracach [65, 82, 105].

3.4. Literaturowy przegląd zagadnienia

R. H. Piva i in. [117] w swojej publikacji oszacowywali, jaki wpływ na właściwości izolacyjne (dielektryczne) glinowych izolatorów ceramicznych ma stężenie tlenku żelaza. Stosowane przez nich próbki z tlenkiem żelaza zostały rozpatrzone z użyciem takich metod jak: dylatometria, dyfrakcja rentgenowska oraz mikroskop elektronowy w celu oceny zmian mikrostrukturalnych. Wyniki badań wskazały, że obecność tlenku żelaza powoduje zwiększenie stałej dielektrycznej (ϵ_r) i tangensa strat ($tg\delta$). J. Hu i in. [72] testowali różne metody badania izolacji w odmiennych warunkach atmosferycznych, takich jak: niskie ciśnienie powietrza, zanieczyszczenia, zlodowacenie, grubość lodu na izolatorach. Do przeprowadzenia badań użyli komory, w której sztucznie wywołano te warunki. Wśród badanych materiałów znalazły się: porcelana, szkło i materiały kompozytowe. Praca poświęcona była zjawisku zwarcia wysokonapięciowego w powietrzu między przewodami (ang. flashover). Autorzy wykazali, że wpływ grubości lodu i ciśnienia atmosferycznego na izolację był bardziej widoczny w przypadku izolatorów wyprodukowanych z materiałów kompozytowych niż w przypadku porcelany i szkła. Zanieczyszczenia natomiast były mało znaczące dla izolatorów z materiałów kompozytowych. Gradient napięciowy jest jednak nieznacznie wyższy dla pokrytych lodem izolatorów z materiałów kompozytowych, niż dla tych z porcelany i szkła. S. Arumugam i in. [5] w swojej publikacji na temat WNZ w izolatorach ceramicznych zanieczyszczonych skroplonymi węglowodorami rozpatrywali wpływ kondensacji węglowodorów (smoły) na zdolność izolowania izolatorów ceramicznych. W tym celu stosowano kilka testowych technik diagnostycznych i działano w szerokim zakresie częstotliwości. Badania przeprowadzono zarówno na czystych, jak i zanieczyszczonych próbkach izolatorów. Wpływ zanieczyszczeń na powierzchni zestawiano z rezystancją izolatora, tangensem strat, impedancją i współczynnikiem rozproszenia. Mierzono także WNZ, które rozwijały się po zanieczyszczonej powierzchni izolatora,

a następnie brano pod uwagę ich kształt. Wnioski z badań zostały weryfikowane eksperymentalnie, a później potwierdzone na rzeczywistych izolatorach. C. Zou i in. [171] w swojej pracy rozważają wpływ absorpcji wody na właściwości następujących dielektryków: żywica epoksydowa, izolacyjne mikro i nanomateriały kompozytowe wypełnione krzemionką. Nanokompozyty pobierały znacznie więcej wody niż te niewypełnione krzemionką, zależnie od mniejszej lub większej zawartości krzemionki. Wyniki pracy pokazują, że cząsteczki wody w nanokompozytach gromadziły się wokół powierzchni nanocząstek. Przy 100%-owej wilgotności woda zaczyna otaczać nanocząstki o grubości około 5 monowarstw. Druga warstwa wody jest rozproszona, jednak wystarczająca, by się utrzymać. Ta warstwa może rozciągnąć się na około 25 nanometrów. Jeżeli woda znajdowałaby się tylko w jednej warstwie otaczającej nanocząstkę, warstwa miałaby grubość wynoszącą około 3-4 nanometry przy 100% wilgotności. J. A. Ardila-Rey w [4] zajmuje się WNZ, ich przetwarzaniem oraz wykrywaniem. W celu scharakteryzowania występowania WNZ, wzięto pod uwagę konieczne wielkości statystyczne. W pracy wymieniono główne trudności i wyzwania, które pojawiają się przy wykrywaniu, rozwoju i przetwarzaniu sygnałów generowanych przez WNZ. Wyniki porównano z systemem detekcji WNZ. R. Bartnikas w [7] omawia dokładnie WNZ, ich mechanizm, wykrywanie i pomiar. W pracy zawarto porównanie procedur wykrywania i pomiaru różnych rodzajów WNZ, które występują w liniach elektroenergetycznych, kondensatorach, transformatorach i maszynach wirujących. Wzięto pod uwagę zarówno szeroko jak i wąskopasmowe detektory WNZ. Szczególną uwagę zwrócono na ich kompatybilność z różnymi urządzeniami elektroenergetycznymi, a także zdolność do zlokalizowania miejsca wyładowania i możliwość rozróżniania różnych form WNZ. Znaczna część pracy jest poświęcona zastosowaniu inteligentnych algorytmów w celu rozpoznawania wzorców WNZ, w powiązaniu z wysokością impulsu wyładowania, jego fazy lub jego kształtem. S. Poyhonen [119] i in. omawiają lokalizowanie defektów izolacji poprzez pomiary WNZ i ich klasyfikację z wykorzystaniem metod numerycznych. Według nich analiza WNZ jest fundamentalnym narzędziem pomocnym w diagnostyce urządzeń izolacji elektroenergetycznej. Sygnały WNZ są analizowane w celu wykrycia i zlokalizowania defektów w izolacji elektrycznej. Automatyczna detekcja defektów izolacji ma szeroki zakres zastosowań przemysłowych. W trakcie badania z rozkładu wyładowania i analiz statystycznych pobierane są różne parametry, w celu ustalenia najbardziej istotnych parametrów dotyczących lokalizacji WNZ. Zastosowano trzy różne metody klasyfikacji numerycznej, które porównano w celu znalezienia najlepszego rozwiązania. M. A. Elborki [38] i in. wymieniają różne typy modeli

defektów związanych z WNZ. Modele zostały użyte w celu zbadania kształtu fali i częstotliwości widm sygnałów pochodzących od WNZ. Następnie informację tą użyto do określenia zależności między sygnałami a typem WNZ. Opisano konfigurację układu pomiarowego i system pozyskiwania danych. Zostały zaprojektowane typowe modele defektów izolacji elektrycznych i użyte w celu zbadania związku między WNZ, a rodzajem izolacji elektrycznej. W pracy zawarto wyniki testowe otrzymane przy trzech typach wyładowania elektrycznego. Autorzy rozróżniają wyładowanie koronowe, powierzchniowe w izolacji olejowej i wyładowanie po zewnętrznej powierzchni w powietrzu. Sygnały są zapisywane przez szerokopasmowy system pomiaru WNZ. Analizy sygnałów wskazują, że typ WNZ może być określony przy użyciu składowych wysokich częstotliwości widma. Wniosek ten jest bardzo ważny w procesie diagnostycznym do identyfikacji WNZ w transformatorach energetycznych. E. Lindell [90] i in. w swojej pracy opisali system pomiaru WNZ, zastosowany do pomiaru powtarzalnych, stromych przebiegów napięcia. Jego działanie opiera się na wykrywaniu ładunków poprzez wykorzystanie pojemnościowego rozdzielania sygnałów WNZ. Ponadto autorzy prezentują obliczenia analityczne szacujące czułość tej metody. Zmierzono funkcję transmitancji systemu pomiarowego i użyto jej w celu rekonstrukcji napięcia występującego na badanym obiekcie. Jeżeli częstotliwość próbkowania jest wystarczająco wysoka, rekonstrukcja spadku napięcia wywołanego wyładowaniem może dostarczyć informacji na temat typu wyładowania. A. Cavallini [25] w swojej publikacji pokazuje nowe metody mające na celu identyfikację defektów występujących w izolacji urządzeń wysokonapięciowych na podstawie pomiarów WNZ. Metoda użyta przez autorów polega na zapisie cyfrowym dużej ilości impulsów WNZ i na podzieleniu sygnałów na jednorodne podklasy. Numeryczne metody analiz sygnałów umożliwiają rozpoznanie obecności szumu wśród różnych podklas. Identyfikacja topologii podstawowych źródeł WNZ (wewnętrznych, koronowych i powierzchniowych) jest możliwa dzięki zastosowaniu algorytmów rozmytych. Zastosowana procedura jest wykorzystywana w odniesieniu do różnych urządzeń wysokonapięciowych, takich jak linie elektroenergetyczne, transformatory dużej mocy i maszyny wirujące.

N. D. Jacob i in. [76] monitorowali podczas normalnej pracy WNZ w środowisku wysokonapięciowym prądu stałego w stacji konwerterowej. Stacje wysokonapięciowe prądu stałego są według autorów trudne do analizowania ze względu na podwyższony poziom zakłóceń spowodowanych przełączaniem konwerterów sterowanych tyrystorowo. Pomiary wykonywano w zakresie wysokich częstotliwości od 400 kHz do 30 MHz za pomocą nowoczesnych urządzeń do pomiarów szerokopasmowych WNZ. Wyniki pokazują, że

możliwe jest mierzenie WNZ w czasie rzeczywistym, oraz że możliwe jest połączenie filtrowania danych z nowoczesnymi metodami przetwarzania sygnału. W. A. Izzati [75] i in. charakteryzują WNZ występujące w nanokompozytowych polimerach w odniesieniu do izolacji elektrycznych. Poprzez dodanie małych ilości nanowypełniaczy, takich jak dwutlenek krzemu (SiO_2), tlenek glinu (Al_2O_3) czy dwutlenek tytanu (TiO_2), właściwości elektryczne polimerów mogą być znacznie polepszone. Odgrywają one dużą rolę w zwiększaniu wytrzymałości dielektryka na przebicie i odporności na WNZ. K. H. McPhee [99] dokonuje charakterystyki zachowań dielektryków nieorganicznych pod wpływem działań temperaturowych, elektrycznych, zmężeń mechanicznych. Autor omawia różne typy materiałów dielektrycznych i podaje ich przykłady. G. Carbajal-de la torre i in. [24] w swojej pracy zajmują się izolatorami ceramicznymi pokrytymi dwutlenkiem tytanu oraz ich właściwościami. Izolatory pokryte są warstwą z dwutlenku tytanu w celu ograniczenia gromadzenia się zanieczyszczeń na jego powierzchni. Wzięto pod uwagę takie właściwości jak: przyczepność, grubość, chropowatość. W badaniu porównano właściwości izolatorów pokrytych warstwą dwutlenku tytanu jak i tych niepokrytych. Charakterystyka powierzchni izolatorów przed i po ekspozycji pola elektrycznego została przeprowadzona z pomocą spektroskopii Micro-Raman. N. Xu i in. [163] w swojej pracy analizują porowatość izolatorów ceramicznych, na podstawie ich gęstości, wytrzymałości na zgniatanie, temperatury. V. Dave i in. [36] przedstawiają strukturalne, optyczne i elektryczne własności hydrofobowych nanostrukturalnych pokryć służących do powlekania izolatorów szklanych aby ograniczyć oddziaływanie zanieczyszczeń. Charakteryzacji warstw dokonano przy użyciu dyfrakcji promienia Rentgena, EDS, profilometru powierzchni, AFM i analizatora impedancji.. N. A. Othman i in. [116] charakteryzowali dystrybucję ładunku na szklanym wysokonapięciowym izolatorze strunowym. Według autorów nieregularne rozproszczenie ładunku po powierzchni izolatora może przyspieszyć starzenie się izolatora i spowodować awarię. Symulacja i wyniki uzyskane na drodze eksperymentów były zgodne ze wzorem rozkładu wyładowania występującym w izolatorze wysokonapięciowym szklanym. Y. Liu i in. [92] w publikacji poświęconej analizie wektorów i wartości własnych energii wyładowań powierzchniowych w celu oceny wytrzymałości polimerowego izolatora w obecności kropeł wody podkreślają, że izolator ten wykazuje właściwości hydrofobowe, wskutek czego pojawia się zjawisko wyładowań powierzchniowych. W celu zbadania właściwości izolatora w obecności kropeł wody określono maksymalną wartość, skumulowany ładunek, wektory oraz wartości własne wyładowania powierzchniowego. Przeanalizowano również ilość kropeł, ich lokację, objętość i zanieczyszczenia na powierzchni izolatora. Wyniki pokazują, że

zarówno ilość, jak i rozmieszczenie kropeł wody mają znaczący wpływ na wyładowania powierzchniowe.

S. M. Gubanski [69] i in. w swojej publikacji omawiają metody diagnostyczne przeznaczone dla izolatorów polimerowych pracujących w powietrzu na zewnątrz rozdzielnic. Autorzy wskazują, że obecnie dostępnych jest wiele typów różnych izolatorów, w tym izolatorów liniowych, kanałowych, aparaturowych od niskich aż do najwyższych napięć. W pracy [69] autorzy proponują metody i narzędzia diagnostyczne w celu wyznaczenia jakości izolatorów kompozytowych. P. Preetha [120] i in. analizują epoksydowe próbki nanokompozytowe z dobrą dyspersją nanocząstek tlenku glinu. Epoksydowe próbki z zawartością 0,1%, 1%, 5%, 10% i 15% wagi masowej nanowypełniaczy zostały przygotowane w laboratorium, a następnie poddano je próbie wysokiego napięcia równego 10 kV w celu uzyskania WNZ. Degradacja powierzchni próbek została przeanalizowana przy użyciu technik SEM, badań profilu powierzchni, spektroskopii FTIR oraz badań WNZ. Podjęto próbę zrozumienia interakcji dynamiki między nanocząstkami i łańcuchem epoksydowym poprzez mierzenie temperatury zeszklenia nanokompozytów. Odporność nanokompozytów na WNZ została porównana z tymi, które nie zostały wypełnione epoksydem, a także z epoksydowymi kompozytami. Zauważono, że nawet z zawartością wypełniacza równą 0,1% wagi masowej, odporność na WNZ jest znacznie poprawiona. Poprawa odporności na degradację jest przypisana interakcjom między nanocząstkami a łańcuchem epoksydowym. Autorzy przedstawiają możliwy mechanizm degradacji powierzchni nanokompozytów. F. Puletti [121] i in. w swojej pracy na temat ryzyka związanego z polimerowymi izolatorami wysokiego napięcia na podstawie oszacowań WNZ opisują najbardziej efektywne metody i narzędzia diagnostyczne, które wydają się być najbardziej skutecznym rozwiązaniem w celu ocenienia i oszacowania ryzyka uszkodzenia, zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym. Autorzy przedstawiają zaawansowane wyniki diagnostyki, pomiarów i analizy WNZ zastosowanych na polimerowych izolatorach linii wysokiego napięcia. Podczas badań zwrócono szczególną uwagę na kwestię redukcji szumu w sygnale, identyfikację i wykrycie WNZ, a także na zlokalizowanie źródła wyładowania. J. Lu i in. w swojej pracy [95] na temat polianilinowych/epoksydowych materiałów kompozytowych o wysokiej stałej dielektrycznej analizuje ich zastosowanie w kondensatorach. Zbadano właściwości elektryczne oraz elektroizolacyjne próbek tych materiałów. M. Chapman i in. w swojej publikacji [27] dotyczącej tłumienia WNZ w wysokonapięciowych maszynach wirujących wyjaśnia, że WNZ są wysoce niepożądane przy długotrwałej pracy maszyn i że związane są one z awarią

izolacji. Artykuł dostarcza informacji na temat właściwości materiałów stosowanych w zwalczaniu WNZ, ich doboru oraz zastosowania w maszynach wirujących pracujących przy wysokim napięciu. E. Gulski w swojej publikacji [70] na temat cyfrowej analizy WNZ przedstawia istotne aspekty cyfrowego przetwarzania WNZ, a także omawia metody konwencjonalnego wykrywania wyładowań. Ponadto autor przedstawia i omawia systematyczne badania nad samymi WNZ poprzez praktyczne analizy wyładowań, włączając w to wykrywanie defektów w konkretnych izolacjach wysokonapięciowych. B. Florkowska i in. w swojej pracy [47] dotyczącej charakterystyki WNZ na emaliowanym przewodzie maszyny elektrycznej pod działaniem naprężeń eksploatacyjnych wyjaśnia, skąd biorą się WNZ w układach elektrycznych maszyn oraz omawia zależność parametrów WNZ i ich wzorów. Mechanizm wyładowań jest wyjaśniony na podstawie symulacji pól elektrycznych oraz pomiarów WNZ, a zwłaszcza wyładowań powierzchniowych w punkcie połączenia przewodów. Autorzy omawiają również główne przyczyny erozji na powierzchni przewodów lakierowanych. G. C. Montanari [102] zajmuje się diagnostyką izolatorów w aparaturze wysokonapięciowej poprzez badania nad WNZ. Według autora niezwykle istotne jest badanie właściwości dielektrycznych izolatorów, aby umożliwić ocenę stanu aparatury elektrycznej.

T. Boczar i in. w swojej publikacji [10] zajmują się kwestią efektywnego i skutecznego rozpoznawania jednorazowych form WNZ pochodzących z jednego źródła, które mogą wystąpić w systemach izolacyjnych transformatorów mocy. W pracy przedstawiono również wyniki badań odnoszące się do stosowania jednokierunkowych sztucznych sieci neuronowych używanych do rozpoznawania podstawowych form WNZ, które mogą pojawić się w izolacji papierowo-olejowej wskutek procesów starzeniowych. Wyniki badań przedstawiają również efektywność rozpoznawania podstawowych form WNZ w zależności od deskryptora analizy emisji akustycznej sygnału. Celem był dobór parametrów wejściowych i wybranie najlepszej sztucznej sieci neuronowej, biorąc pod uwagę efektywność rozpoznawania i czas obróbki. T. Boczar i in. w [20] przedstawiają próbę zastosowania narzędzi do analizy spektralnej w przetwarzaniu impulsów EA generowanych przez WNZ. W pracy autorzy opisują iskierniki generujące cztery rodzaje WNZ, a także określają parametry zmierzonych sygnałów akustycznych, oraz charakteryzują układ użyty do pomiaru i analizy widma częstotliwości. Ponadto, w pracy [20] zaprezentowano procedurę analizy widmowej i zdefiniowano dziedzinę częstotliwości deskryptorów charakteryzujących impulsy emisji akustycznej (EA). Wyniki analizy podano zarówno jako wykresy czasowe jak i widma amplitudy i gęstości energii w powiązaniu z wartościami powiązanych deskryptorów. T. Boczar i in. w [11] odnoszą się do możliwości doskonalenia metody EA podczas używania jej do wykrywania, pomiaru

i lokalizacji WNZ w olejowych układach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. W szczególności przedstawiono podstawowe założenia i opisano elementy eksperckiego systemu diagnostycznego, który używa metody akustycznej do oceniania stanu mierzonej izolacji transformatora energetycznego. Pomiar dokonywany jest w warunkach eksploatacyjnych, podczas normalnej, standardowej pracy transformatora. System składa się z czterech podstawowych modułów: czyli systemu pomiarowego, systemu przetwarzania, systemu analizy, bazy wiedzy i klasyfikatora. Szczególną uwagę poświęcono opisowi deskryptorów wieloparametrowych charakteryzujących sygnały EA w dziedzinie czasu i częstotliwości. Dobrane deskryptory (w ściśle określonych warunkach metrologicznych) sprawiają, że możliwe jest rozpoznanie podstawowych form WNZ, które mogą pojawić się w izolacji papierowo-olejowej.

M. Brockschmidt i in. w pracy [21] dotyczącej testów nanomateriałów izolacyjnych omawia nanocząstki, które mogą służyć do poprawy właściwości elektrycznych materiałów izolacyjnych oraz opisuje, jaki mają one wpływ na starzenie danego materiału, a także na jego poszczególne własności fizyczne i chemiczne. Decydujące znaczenie ma dobór materiału wypełniającego w połączeniu z matrycą przenoszącą, jak i technologia wypełnienia. Według autora użyteczne jest opracowanie procedury testowej, która pozwala na wykonanie dużej liczby testów na różnych dielektrykach. Istotne jest też laboratorium, w którym można generować wysokie napięcie w celu badania wytrzymałości podczas prób elektrycznych, kiedy są generowane WNZ. Praca opisuje także doświadczenia z różnymi zawartościami nanocząstek krzemionki w matrycach z żywicy epoksydowej. Jest to podstawą do opracowania nowych, efektywniejszych układów izolacyjnych, które można zastosować w urządzeniach wysokonapięciowych takich jak maszyny wirujące. C. Menguy i in. w pracy [101] poświęconej pomiarom WNZ występujących w układach izolacyjnych skupiają się na aparaturze służącej do tego celu. Autorzy wymieniają korzyści wynikające z pomiarów i analizują zdolność tych urządzeń do pracy w środowisku przemysłowym. H. Okubo w pracy [114] dotyczącej polepszenia izolacji elektrycznej przedstawia rozwój oraz wyniki badań mających na celu ulepszenie technik wykonywania izolacji elektrycznej przeznaczonej dla urządzeń pracujących przy wysokim napięciu, np. transformatorów, rozdzielnic i linii elektroenergetycznych. Autor przedstawia analizę pola elektrycznego, a także techniki pomiaru pola, w celu omówienia aparatury pracującej w polu elektrycznym o wysokim natężeniu. Następnie autor charakteryzuje różne dielektryki: gazowe, cieczowe, stałe, próżnię i materiały kompozytowe, używane w celu zapewnienia wyższej wytrzymałości elektrycznej, mniejszych strat, mniejszego oddziaływania na środowisko i większej niezawodności.

W procesie rozwoju zastosowano nowe, skomplikowane podejście w celu wyjaśnienia mechanizmów fizycznych WNZ. Poprzez wprowadzenie i zastosowanie wymienionych technik badania izolacji elektrycznej autor proponuje koncepcje wyposażenia układów izolacyjnych w aparaturę diagnostyczną.

Z. Li i in. w pracy [87] poświęconej skutkom dodania nanowypełniacza omawia odporność na WNZ i na napięcie przebicia dielektryków zbudowanych z materiału kompozytowego (mikro-tlenek glinu żywica, epoksydowa). F. Guastavino i in. w [68] zajmują się analizą morfologiczną i diagnostyką wad wewnątrz izolacji w transformatorach prądowych średniego napięcia wywołanych przez WNZ. Autorzy przedstawiają systematyczny sposób pracy nad rozpoznawaniem, analizą morfologiczną i diagnostyką defektów wewnątrz układu izolacyjnego transformatorów średnionapięciowych. Specjalnie wykonano różne formy typowych defektów (rozwarstwienia, otwory) na powierzchni obiektów testowanych i w izolacji. Wszystkie próbki poddano szeregom testów na oddziaływanie WNZ. Wyniki pokazują, że dzięki detekcji WNZ możliwe jest efektywne wykrywanie i określanie morfologii wad. Y. Cao i in. w [23] zajmują się wykorzystaniem nanodielektryków w przemyśle energetycznym. Autorzy omawiają zagadnienie oceniając potrzeby rozwojowe i przyszły potencjał do zaprojektowania materiałów nanostrukturalnych do celów izolacyjnych. T. Christen w pracy [32] o granicznych wymaganiach izolacji HVDC (linie wysokiego napięcia prądu stałego) w celu modelowania i symulacji koncentruje się na odległościach elektrod w izolatorze, które odgrywają decydującą rolę dla rozkładu pola w tego typu izolacji. W publikacji autor opisuje makroskopowe warunki brzegowe i związane z nimi kwestie dotyczące przesyłu dużej mocy i przedstawia ich znaczenie na prostych przykładach. T. Tanaka w [146] opisuje dielektryczne nanokompozyty z właściwościami izolacyjnymi. T. Tanaka i in. w [147] zajmują się polimerowymi, nanokompozytowymi dielektrykami i rozpatrują ich możliwości zastosowania jako izolatorów do takich celów jak: technologia przetwarzania, charakterystyka materiałowa i zastosowania w przyszłości. Dodanie tylko kilku procent wagowego nanowypełniacza ma bardzo głęboki wpływ na fizyczne, chemiczne i elektryczne właściwości polimerów. Taka zmiana może być według autora bardzo korzystna dla inżynierii wysokonapięciowej. M. Roy i in. w [122] opisują wpływ wprowadzenia nanocząstek krzemionki do polietylenu. Powoduje ono znaczne zwiększenie napięcia przebicia i wytrzymałości elektrycznej, w porównaniu do wprowadzenia mikrowypełniaczy. Ponadto, spektroskopia dielektryczna wykazała zmniejszenie przenikalności elektrycznej nanokompozytowego polimeru.

G.C. Stone w [138] opisuje znaczenie fazy w analizie WNZ odnośnie diagnostyki izolacji w urządzeniach elektroenergetycznych z izolacją wysokonapięciową. Autor opisuje pomiary laboratoryjne WNZ, które polegają na wyświetlaniu cyfrowych impulsów w korelacji do częstotliwości generacji WNZ, a układy diagnostyczne dla pomiarów na liniach elektroenergetycznych, transformatorach czy maszynach wirujących. Teoria pokazuje, że w zależności od formy WNZ będą występować przy konkretnej polaryzacji i pozycji fazy. W zależności od położenia WNZ na sinusoidzie napięcia zasilającego do elektrod, wzorce wyładowań zmieniają się. Pomimo wielu udokumentowanych wzorców, otrzymanych dzięki badaniu różnych form WNZ, na podstawie których skonstruowano komercyjne i przemysłowe detektory WNZ stosowane w badaniu urządzeń wysokonapięciowych, nadal nie zawsze da się prawidłowo przewidzieć typ i formę wyładowania. M.H. Ahmad i in. w [1] opisują zależność wpływu temperatury na rozwój WNZ i drzewienie elektryczne powstałe na nanokompozycie z kauczuku silikonowego. Y. Gao i in. w [64] opisują zmiany wytrzymałości elektrycznej izolacyjnych materiałów polimerowych napromieniowanych wysoką dawką promieni gamma. Uzyskane wyniki wskazują, że zmiana odporności na WNZ jest zależna od całkowitej dawki napromieniowania i zmienia się wraz z materiałem. H. Al-Marzouqi w [2] zajmuje się algorytmem segmentacji opartym na gęstości w celu interpretowania danych o WNZ. Według autora interpretacja sygnałów pochodzących od WNZ stała się ważnym narzędziem w precyzyjnym oszacowywaniu wytrzymałości elektrycznej izolacji wysokiego napięcia w maszynach elektrycznych. Autor proponuje nowe podejście do interpretacji sygnałów WNZ, polegające na analizie wzorów WNZ. S. Karmakar w [79] opisuje eksperymentalne badania napięcia przebicia w powietrzu i jego wpływu na izolację stałą. Badania dotyczące przebicia elektrycznego przeprowadzono w laboratorium wysokonapięciowym, używając standardowych elektrod w kształcie kuli o średnicy 25cm. Zbadano napięcie przebicia w powietrzu z barierą izolacyjną i bez niej. Autor porównał mikrostrukturę izolatorów przed i po testach przebicia. N. Kuljaca i in. w [84] zajmują się odseparowaniem wielu źródeł w pomiarach WNZ używając schematu zależności między amplitudą oraz częstotliwością. K. Wu i in. w [162] zajmują się badaniem czynników indukujących równoczesne wyładowania we wgłębieniach izolatora. Autorzy badają skutki fotojonizacji i przepięcia na prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowań jednoczesnych. W celu równoczesnej obserwacji powierzchni wyładowania i WNZ na próbkach opracowano specjalny układ diagnostyczny.

D. Tehlar i in. w [148] przedstawiają stanowisko badawcze do wykonywania testów izolatorów wysokonapięciowych i występujących na nich WNZ za pomocą ultrakrótkich

impulsów rentgenowskich (promieni X). Autorzy stosują metodę PXIPD (ang. Pulsed X-ray Induced Partial Discharge), w celu rutynowego testowania izolatorów nawet do 420 kV. Bardzo niski poziom szumu pomiarowego zezwala na automatyczną analizę wyników. Według autorów przebadano już ponad 20,000 izolatorów za pomocą tej metody. H. A. Illias i in. w [74] zajmują się pomiarami i modelowaniem zachowań WNZ w kulistym defekcie wewnątrz dielektryka stałego. Autorzy charakteryzują dokładnie zjawisko WNZ występujące w układach izolacyjnych. P. Trnka i in. w [150] także zajmują się pomiarami WNZ. Autorzy wymieniają różne metody pomiarów wyładowań oraz ich znaczenie dla diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Autorzy porównują proces starzenia dielektryków pod wpływem napięcia stałego oraz pod wpływem napięcia przemiennego. M. A. Fard i in. w [39] zajmują się klasyfikacją defektów WNZ używając systemu ANFIS (ang. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Autorzy wymieniają różne metodologie w celu diagnostyki systemów izolacyjnych, m. in. PRPD (ang. Phase Resolve Partial Discharge). Autorzy łączą obydwie metody, w efekcie uzyskując gotową klasyfikację defektów WNZ.

Metoda optyczna w zastosowaniu do detekcji i lokalizacji WNZ występujących w powietrzu i w oleju elektroizolacyjnym rozwijana jest m.in. na Politechnice Opolskiej [12-19, 51-59, 133]. WNZ rozpoznawane są za pomocą techniki spektroskopii optycznej i fotopowielacze działające w zakresie UV [3, 29, 31, 37, 63, 71, 78, 86, 96-98, 103, 109-113, 117, 154]. Schwarz i in. [124-129] wykorzystuje metodę optyczną do detekcji WNZ, które były generowane w układach modelujących typu ostrze-płyta, umieszczonym w środowisku olejowym lub w powietrzu. Do transmisji sygnałów optycznych wykorzystywali przewód światłowodowy. G. Wu w pracy [161] scharakteryzował WNZ zarejestrowane przy wykorzystaniu głowicy światłowodowej i fotopowielacza. Zgodnie z uzyskanymi przez niego wynikami liczba WNZ nie wpływa na amplitudę mierzonych widm emisyjnych, ma natomiast wpływ na ilość zarejestrowanych impulsów optycznych. Podobny laboratoryjny układ pomiarowy wykorzystał W.S. Wang w pracy [159], w którym rejestrował promieniowanie UV emitowane przez wyładowania typu koronowego. X. Bian i in. w pracy [9] rejestrowali promieniowanie UV emitowane przez WNZ typu koronowego występujące na elementach linii elektroenergetycznych. Autorzy przebadali zależność intensywności promieniowania od odległości do punktu generacji WNZ. Także Y. Limin i in. w pracy [89] analizowali sygnały optyczne emitowane przez WNZ typu koronowego. Autorzy scharakteryzowali zakłócenia mające wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów sygnałów optycznych w zakresie UV, w tym na uzyskiwane obrazy będące wizualizacją intensywności WNZ. WNZ występujące w izolacji

gazowej zostały przebadane z wykorzystaniem metody spektrofotometrii optycznej m.in. w pracy M. Kaufhold i in. [80]. Autorzy scharakteryzowali podstawowe deskryptory widma emisyjnego, które zostały skorelowane z wynikami uzyskanymi za pomocą metody elektrycznej. X. Meng i in. w pracy [100] scharakteryzowali sygnały optyczne w zakresie UV generowane na izolatorach elektroenergetycznych o różnym poziomie zanieczyszczenia. Także F. Lu i in. w pracy [94] przedstawili zależność widm emisyjnych w zakresie UV od stopnia zanieczyszczenia izolatorów ceramicznych. Do badań zastosowano narzędzia numeryczne umożliwiające klasyfikację rozmytą. Izolatory porcelanowe przebadano pod kątem występowania WNZ typu koronowego w pracy K. Schong i in. [131]. Autorzy zmieniali warunki metrologiczne i badali korelacje między rejestrowanymi za pomocą metody optycznej i termowizyjnej. Ważną pozycję literaturową odnoszącą się do tej problematyki stanowi praca P. Frącza [60].

4. Pomiar widm optycznych emitowanych przez WNZ

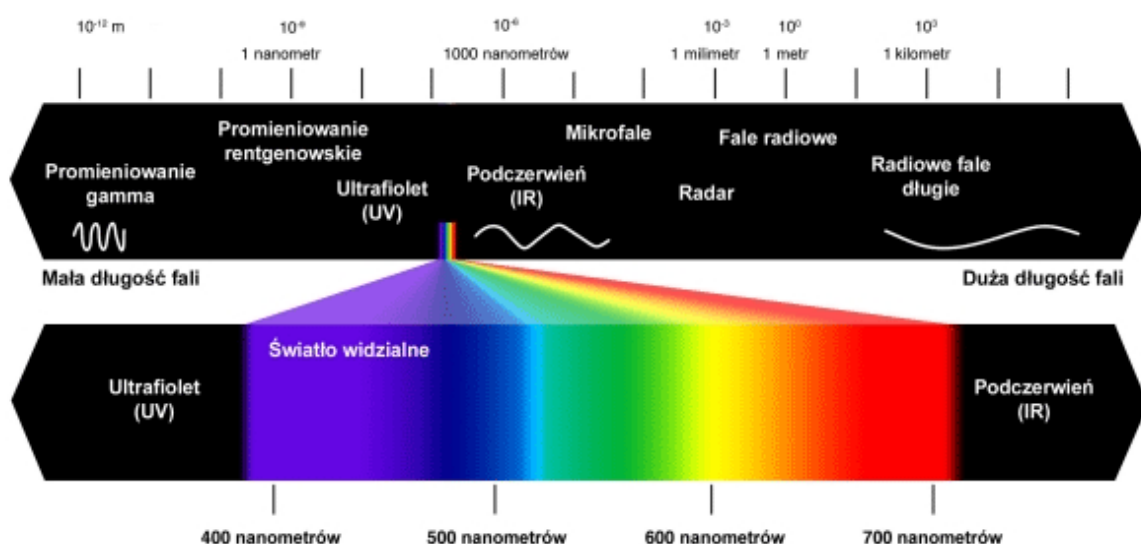
4.1. Metrologiczne możliwości detekcji i pomiarów widm emisyjnych

Obecnie istnieje wiele metod detekcji WNZ występujących w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Metody diagnostyczne dzieli się na metody inwazyjne i metody nieinwazyjne. Metody inwazyjne (elektryczne) wykonywane są na pracujących urządzeniach. Polegają one na detekcji i rejestracji prądów WNZ za pomocą specjalnych sond pomiarowych, które wyrażają wartość WNZ w pC. Wadą takich metod jest konieczność odłączenia badanego urządzenia od zasilania na czas podłączenia i odłączenia aparatury pomiarowej. Alternatywne metody nie wymagają inwazji w pracę urządzenia, dzięki czemu są bezpieczniejsze dla osób wykonujących pomiar, a urządzenia pomiarowe są zwykle podręczne i przenośne. Do metod nieinwazyjnych zalicza się metodę ultradźwiękową i elektromagnetyczną. Metoda akustyczna pozwala na wykrywanie ultradźwięków (ciśnienia akustycznego) w zakresie do 500 kHz generowanych we wczesnym stadium WNZ powierzchniowych, przy zastosowaniu specjalistycznych przyrządów. W niektórych przypadkach WNZ powierzchniowe emitują słyszalne fale dźwiękowe. Metoda elektromagnetyczna w zależności od zastosowanego instrumentu pozwala na rejestrację intensywności widma w różnym zakresie promieniowania. Na podstawie wiedzy dostępnej obecnie stwierdzono, że emitowane widmo mieści się w zakresie od ultrafioletu do podczerwieni, a w izolacji polimerowej kabli elektroenergetycznych WNZ emitują także promieniowanie X (rentgenowskie) z zakresu od 10 pm do 10 nm [125-126, 132].

W niniejszej rozprawie rejestrowano promieniowanie w zakresie ultrafioletu. Właściwości promieniowania elektromagnetycznego (rys. 4.1) emitowanego podczas WNZ zależą od rodzaju materiału izolacyjnego i parametrów ośrodka propagacji i środowiska otaczającego obszar generacji WNZ takich jak ciśnienie, temperatura, wilgotność.

Do detekcji promieniowania ultrafioletowego wykorzystuje się fotoogniwa, fotopowielacze i przetworniki promieniowania. Pasma to dzieli się w sposób umowny na następujące pasma: skrajny (nadfiolet próżniowy) (10–121) nm, daleki (122–200) nm, pośredni (200–300) nm, bliski (300–400) nm. Promieniowanie ultrafioletowe dzieli się ze względu na skutki działania na organizmy żywe na: UVC (200–280) nm, UVB (280–315) nm, UVA (315–400) nm [http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/promieniowanie-nadfioletowe;3962661.html, dostęp kwiecień 2015r.].

Promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie widzialnym, ultrafioletowym i podczerwonym nazywane jest również promieniowaniem optycznym.



Rys. 4.1 Spektrum promieniowania elektromagnetycznego [www.genius.edu.pl, dostęp: kwiecień 2015].

Promieniowanie słoneczne zawiera zakresy UVA, UVB i UVC, jednak UVC jest całkowicie pochłaniane przez ziemską atmosferę. Natomiast część UVB pochłaniana jest przez warstwę ozonową. W efekcie około 97% promieniowania UV, które dociera do powierzchni Ziemi to UVA. Fotony promieniowania UVB i UVC posiadają dużą energię i jeśli są pochłaniane przez daną substancję mogą wyraźnie wpływać na jej właściwości fizyko-chemiczne.

Istotnym parametrem mającym wpływ na dokładność i efektywność uzyskiwanych wyników pomiarów jest wielkość tłumienia i dyspersji sygnałów optycznych zależna od

odległości urządzenia rejestrującego od punktu generacji WNZ [128, 129, 145, 164]. Podstawową techniką rejestracji promieniowania optycznego jest spektrofotometria. Jej główną zaletą jest galwaniczna separacja stanowiska pomiarowego od badanego urządzenia, które znajduje się pod wysokim napięciem. Dzięki temu na uzyskiwane wyniki nie mają wpływu zewnętrzne pola elektromagnetyczne o dużym natężeniu i inne rodzaje zakłóceń, które mają negatywny wpływ na sygnały rejestrowane metodą elektryczną lub akustyczną. Warunkiem koniecznym detekcji WNZ za pomocą metody optycznej jest bezpośrednia linia widoku (ang. line of sight).

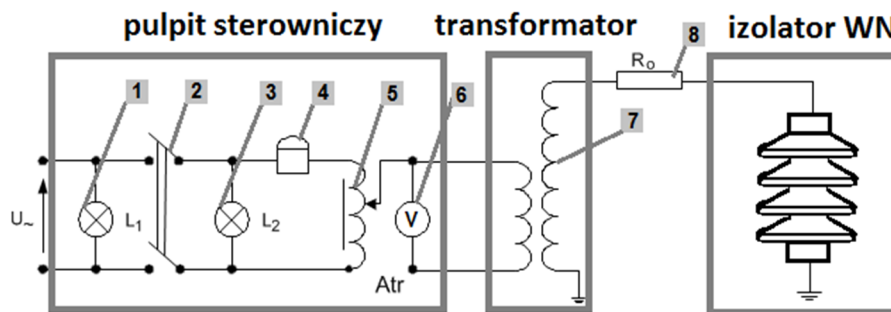
Obecnie do prac diagnostycznych dotyczących oceny stanu technicznego urządzeń elektroenergetycznych i linii przesyłowych wysokiego napięcia wykorzystywane są specjalistyczne kamery umożliwiające detekcję i lokalizację WNZ koronowych, powierzchniowych i łuków, a w szczególności rejestrację emitowanych przez nie fotonów w paśmie częstotliwości UV [30, 66, 130, 165]. Najbardziej znane z literatury przedmiotu są kamery CoroCAM, Lilin6, CornoScop i DayCor, które były stosowane przez autorów prac [91, 130, 165-167, 170]. Istnieje również szereg prac opisujących prototypowe rozwiązania. Przykładowo w pracy [136] przedstawiono układ do rejestracji widm emisyjnych w zakresie podczerwieni, widzialnym i ultrafioletowym.

W pracach [168-169] zaprezentowano autorskie rozwiązania umożliwiające pomiar intensywności promieniowania UV. Mechanizm pracy kamer UV polega na jednoczesnej detekcji i rejestracji fotonów w zakresie widzialnym i UVC. Należy przypomnieć, że UVC pochodzenia słonecznego jest filtrowane w sposób naturalny przez ziemską atmosferę. Omawiane urządzenie wyposażone jest w matrycę czujników promieniowania UV i w standardową matrycę CCD, do detekcji światła widzialnego. Wartości uzyskane z obu matryc są na siebie nakładane w efekcie czego powstaje zdjęcie fotografowanego zjawiska z naniesionymi plamkami w miejscach gdzie urządzenie zarejestrowało fotony UV. Liczba plamek jest zliczana i korelowana z intensywnością występowania WNZ.

Alternatywną metodą rejestracji promieniowania optycznego jest technika spektrofotometryczna umożliwiająca rejestrację nie tylko intensywności promieniowania lecz przede wszystkim występowania i kształtu widma obecnego w emitowanych sygnałach. W technice tej stosuje się spektrofotometry, które obecnie buduje się z zestawów fotodiod o zmiennych długościach światła, światłoczułych detektorów CCD i specjalnego oprogramowania.

4.2. Charakterystyka układu probierczego wysokiego napięcia

Obiekty elektroenergetyczne, w których badano WNZ zasilane były z układu probierczego wytwarzającego wysokie napięcie przemienne. Schemat układu, który składał się z pulpitu sterowniczego i transformatora probierczego przedstawiono na rys. 4.2. Źródłem zasilania było napięcie sieciowe, które przekazywane było na transformator regulacyjny (autotransformator), umożliwiający płynną, manualną regulację napięcia. W badaniach zastosowano transformator probierczy o przekładni 220/110000 V. Podstawowymi parametrami układu są napięcie znamionowe, moc znamionowa i moc zwarciova. Napięcie znamionowe określa najwyższe napięcie po stronie uzwojenia wysokiego napięcia, które można uzyskać podczas pomiarów. Moc znamionowa określana jest przez iloczyn napięcia znamionowego i prądu znamionowego ciągłego. Dodatkowo określa się prąd znamionowy 15-to minutowy, który jest większy od prądu ciągłego. Pozwala to na poddanie transformatora krótkotrwałym, za to większym obciążeniom, bez podejmowania ryzyka przekroczenia dopuszczalnej temperatury uzwojeń. Obiekty poddane badaniom mają charakter pojemnościowy. Moc przez nie pobierana może być obliczana jako iloczyn kwadratu napięcia probierczego, pulsacji i pojemności odbiornika. Po wystąpieniu przebicia badanego układu, transformator przechodzi ze stanu jałowego w stan zwarcia i musi być natychmiast wyłączony. W celu ochrony izolacji transformatora probierczego przed przepięciami, stosuje się rezystory tłumiące, które zwykle mają wartość kilkuset omów.



Rys. 4.2 Schemat blokowy układu zasilania wysokiego napięcia. 1 i 3 - lampki kontrolne, 2 - przełącznik, 4 - zabezpieczenie nadprądowe, 5- transformator regulacyjny, 6- woltomierz, 7 - transformator probierczy, 8- rezystor ochronny (tłumiący) [opracowanie własne].



Rys. 4.3 Ogólny widok wykorzystanego układu probierczego wysokiego napięcia [zdjęcie własne].

4.3. Dobór dielektryków i układów izolacyjnych

Rozprawa obejmuje badanie widm emisyjnych różnych układów izolacyjnych wykonanych z ceramiki elektrotechnicznej (porcelany). Ogólny widok badanego izolatora kołpakowego typu LK 250 (LK) przedstawiono na rys. 4.4. Izolatory tego typu były stosowane na liniach przesyłowych średnich i wysokich napięć. Pojedyncze kołpaki łączy się ze sobą w łańcuch za pomocą metalowych sworzni i gniazd. Długość łańcucha zależy od wartości napięcia. Kołpak tego typu zbudowany jest z porcelanowej lub szklanej części izolacyjnej, metalowego trzonka i okuć, umocowanych pod i nad dielektrykiem. W przypadku hartowanych izolatorów szklanych, po przebicciu lub uszkodzeniu mechanicznym, łańcuch nie zostaje zerwany, a uszkodzenie jest łatwo widoczne. Wymiary izolatorów kołpakowych wynoszą standardowo 146x254 mm. Wytrzymałość mechaniczna w zakresie 80-120 kN zawdzięcza się specjalnemu ukształtowaniu typu gruszka, które powoduje, że siła rozciągająca jest zmieniana w siłę ściskającą materiał dielektryczny. Wynika to z faktu, że odporność materiałów ceramicznych na ściskanie jest kilkakrotnie większa niż na rozrywanie. Nierównomierne rozłożenie napięcia wzdłuż łańcucha zbudowanego z izolatorów kołpakowych powoduje, że napięcie przeskoku całego łańcucha jest mniejsze niż suma napięć przeskoków pojedynczych elementów. Najwyższe napięcie występuje przy przewodzie wysokiego napięcia na najniżej zawieszonym kołpaku. W celu wyrównania rozkładu napięć na łańcuchu stosuje się pierścienie sterujące rozkładem pojemności [33-34, 144].

Kolejnym obiektem badań był porcelanowy izolator długopniowy typu LS 75/21 (LS) wykonany z ceramiki elektrotechnicznej. Ogólny widok badanego izolatora typu LS przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4 Zdjęcia układów izolacyjnych poddanych badaniom. Po lewej: izolator kołpakowy porcelanowy typu LK. Po prawej: izolator długopniowy wykonany z porcelany (obiekt obrócony o 90°) typu LS. [Zdjęcia własne].

W ramach badań wykonano pomiary WNZ metodą optyczną na różnych izolatorach walcowych wykonanych z porcelany elektrotechnicznej. Ogólny widok wykorzystanych w badaniach izolatorów przedstawiono na rys. 4.5. Natomiast sposób montażu obiektu przygotowanego do badań przedstawiono na rys. 4.6. W izolatorze walcowym z porcelany (WPP) wykonano pomiary dla różnych odległości między elektrodami wysokiego napięcia i uziemiającą. Do pomiarów przyjęto następujące odległości: 3 cm, 5 cm, 7 cm, 9 cm i 11 cm. Wykonano również pomiary dla izolatora walcowego wykonanego z porcelany wypełnionego dielektrykiem kwarcowym (WPK) na odległościach między elektrodami 3 cm i 5 cm.



Rys. 4.5 Ogólny widok badanych izolatorów walcowych. [Zdjęcia własne].



Rys. 4.6 Zdjęcie izolatora walcowego wykonanego z porcelany typu WPP/WPK, obrazujące sposób montażu obiektu przygotowanego do badań. [Zdjęcia własne].

4.4. Metrologiczna charakterystyka układu pomiarowego, wykorzystywanego do detekcji i pomiarów widm optycznych

Do pomiaru promieniowania optycznego emitowanego przez WNZ generowane na powierzchni opisanych wyżej izolatorów zastosowano kamerę UV DayCor Superb (rys. 4.7) i spektrofotometr optyczny firmy Ocean Optics typ HR4000 (rys. 4.8). Kamerę UV instalowano na statywie w stałej odległości od badanych izolatorów. Przetwornik optyczny umieszczano w specjalnie wykonanym uchwycie zamocowanym w statywie, co umożliwiło regulację wysokości, kąta nachylenia i odległości między głowicą pomiarową i obszarem występowania WNZ na badanym izolatorze.

Kamerę UV DayCor Superb, którą wykorzystywano w pomiarach, wyprodukowała firma OFIL Systems. Jest to profesjonalna kamera przeznaczona do monitoringu sieci elektroenergetycznych średnich, wysokich i najwyższych napięć. Zasada pomiaru opiera się na zliczaniu impulsów generowanych przez detektory światła, przy czym w kamerze wbudowane są detektory reagujące na fotony z dwóch zakresów: UV (250-280) nm i widzialnym. Uzyskaną liczbę zliczonych fotonów z zakresu UV oprogramowanie urządzenia nakłada na zdjęcie widzialne badanego izolatora, które otrzymywane jest przy użyciu standardowej matrycy CCD, czułej na światło widzialne. Po nałożeniu jednego obrazu na drugi powstaje precyzyjny obraz intensywności WNZ. Pozostałą część obrazu stanowi zdjęcie w świetle widzialnym. Zastosowane w kamerze obiektyw i filtr optyczny zostały zoptymalizowane pod kątem zobrazowania efektu WNZ wraz z otaczającą ich sceną w świetle widzialnym. W ten sposób możliwa jest detekcja i lokalizacja miejsc występowania

oraz pomiar intensywności WNZ. Podczas pomiarów rejestrowane obrazy były bezpośrednio prezentowane na kolorowym wyświetlaczu LCD, zapisywane, a następnie poddawane analizom. Wyniki badania izolatorów wykonanych z porcelany przedstawiono w rozdziałach 5.1-5.4 i 7.1-7.4, natomiast zestawienie porównawcze analiz i dyskusję wyników uzyskanych dla wszystkich przebadanych izolatorów przedstawiono w rozdz. 7.5-7.6.



Rys. 4.7 Po lewej: zdjęcie kamery UV DayCor Superb. Po prawej: ogólny widok ekranu kamery podczas rejestracji widm emisyjnych generowanych przez WNZ. [Zdjęcie własne].

W tabelicy 4.1 zestawiono podstawowe parametry techniczne zastosowanej w pomiarach kamery UV DayCor Superb.

Tablica 4.1

Zestawienie podstawowych parametrów technicznych kamery UV DayCor Superb.

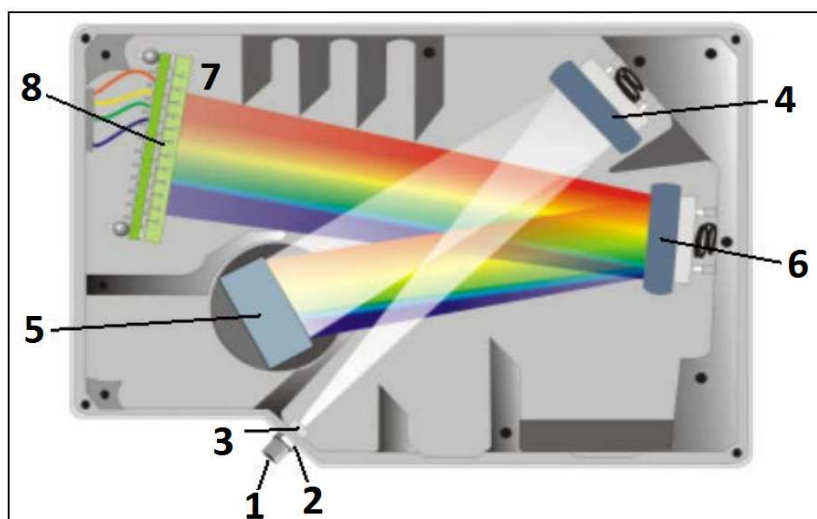
Lp	Parametr	Wartość	Jednostka
1	Zakres spektralny UV	(250 -280)	nm
2	Zakres światła widzialnego	(380 -780)	nm
3	Czułość w zakresie UV	3×10^{-18}	W/cm ²
4	Minimalna czułość oświetlenia	1	Lux
5	Matryca	640x480	pikseli
6	Prezentacja obrazu UV/światło widzialne	kąt bryłowy o dokładności lepszej niż 1	mili radian
7	Tryb pracy	widzialny / UV / łączony	-
8	Temperatura pracy i przechowywania	20 ... +55	°C

Zasadę działania spektrofotometru HR4000 (rys. 4.8) obrazuje schemat przedstawiony na rys. 4.9.



Rys. 4.8 Po lewej: ogólny widok spektrofotometru firmy Ocean Optics typ HR4000. Po prawej: sposób montażu spektrofotometru na pojedynczym kołpaku izolatora długopniowego wykonanego z porcelany. [Zdjęcie własne].

Światło wpada przez specjalny łącznik SMA 905 (1) i zostaje przekazane do włókien światłowodowych poprzez szczelinę, w postaci apertury wykonanej w ciemnym materiale (2). Wielkość szczeliny reguluje ilość wpadającego światła i kontroluje rozdzielczość widmową. Zanim światło przedostanie się do środkowej części urządzenia, przechodzi przez filtry (3) wąsko i szerokopasmowe. Następnie światło ulega odbiciu w zwierciadle kolimacyjnym (4) i zostaje skierowane na siatkę (5) powodującą jego dyfrakcję. W zależności od rodzaju siatki, a w szczególności od gęstości rowków dyfrakcyjnych, możliwe jest dopasowanie zakresu i rozdzielczości rejestrowanych długości fal (prążków). Następnie rozszczipione światło skupiane jest w soczewce skupiającej (6) i skierowane na detektory CCD Toshiba TCS1304AP (8). Opcjonalnie w urządzeniu wbudowane są soczewki detektorów L2 (7), które mają na celu poprawę efektywności poprzez redukcję efektów rozproszenia. Każdy piksel detektora CCD odpowiada długości fali, która w niego uderza, reagując cyfrowym impulsem w odpowiedzi. Pomiar w poszczególnym elemencie (piksela) matrycy CCD polega na zliczeniu fotonów uderzających w jednostce czasu. Jedno zliczenie odpowiada aktywacji przez 100 fotonów. Czas integracji (zliczania) można zmieniać w zakresie od 3,8 ms do 20 s. Powstały sygnał cyfrowy transmitowany jest do oprogramowania, które wynik wyświetla na ekranie komputera. Zarejestrowane sygnały były zapisywane, a następnie poddawane analizom. Najważniejsze wyniki odnoszące się do izolatorów zbudowanych z porcelany zawarto w rozdziałach 6.1-6.3 i 8.1-8.4. Natomiast zestawienie porównawcze i dyskusję wyników przedstawiono w rozdz. 8.5.



Rys. 4.9 Ideowy schemat działania spektrofotometru Ocean Optics typ HR4000. [Instrukcja obsługi urządzenia].

Zastosowany spektrofotometr nie wymagał kalibracji przed rozpoczęciem pomiarów, gdyż został skalibrowany przez producenta. Jednak z biegiem czasu pod wpływem warunków środowiskowych długość fali może ulec nieznacznym zmianom, dlatego producent zaleca cykliczne wykonywanie procesu kalibracji zgodnie z dokumentacją urządzenia. W tabelicy 4.2 zestawiono podstawowe parametry techniczne zastosowanego w pomiarach spektrofotometru Ocean Optics typ HR4000. Do archiwizacji i przetwarzania zarejestrowanych danych pomiarowych zastosowano procedury numeryczne zaimplementowano w środowisku programistycznym Matlab.

Tablica 4.2

Charakterystyka parametrów technicznych spektrofotometru Ocean Optics typ HR4000.

Lp	Parametr	Wartość	Jednostka
1	Detektor CCD	Toshiba TCS1304AP - 3648	piksel
2	Czas integracji (czas trwania zliczania)	od $3,8 \times 10^{-3}$ do 20	s
3	Rodzaj łącza optycznego	SMA 905	
4	Szerokości szczelin apertury	5,10,25,50,100, 200	μm
5	Rozdzielczość optyczna	$\sim 0,02 - 8,4$	nm FWHM
6	Rozproszenie światła	$<0,05\%$ dla 600, $<0,1\%$ dla 435	nm
7	Zakres światła widzialnego	190 -1100	nm
8	Zakres spektralny UV	200 -1100	nm
9	Zakres dynamiczny	1300:1	
10	Skorygowana liniowość	$>99,8$	%
11	Rozdzielczość A/D	14	bitów
12	Maksymalna rata digitalizacji pikseli	1	MHz
13	Wielkość piksela - elementu CCD	8 x 200	μm
14	Czułość	100 na zliczenie dla 800 nm	fotonów

4.5. Zakres przeprowadzonych pomiarów

Wszystkie pomiary wykonano w zaciemnionym pomieszczeniu laboratorium wysokich napięć Politechniki Opolskiej. Rejestrację pojedynczego sygnału optycznego z wykorzystaniem kamery UV wykonywano w czasie około 3 minut, w trakcie których dokonywano zapisu około 30 wartości określających liczbę zliczeń, wskazywanych na wyświetlaczu kamery. Cykle pomiarowe wykonywano dla różnych wartości napięcia zasilającego w zakresie od napięcia początkowego U_0 do U_p . Przed rozpoczęciem rejestracji sygnałów, kamera pracowała przez okres ok. 30 sekund, co wynikało z konieczności dopasowania się detektorów kamery do zmienionych warunków metrologicznych. Napięcie początkowe U_0 wyznaczano na podstawie odczytu wartości woltomierza w chwili gdy kamera UV wskazywała liczbę zliczeń powyżej 10. Napięcie przebicia było zależne od rodzaju badanego dielektryka porcelanowego i odległości między elektrodami. W trakcie wszystkich pomiarów utrzymywano tę samą odległość między soczewką pomiarową, a izolatorem i te same parametry kamery UV. Dla każdego z badanych dielektryków przed rozpoczęciem rejestracji WNZ pięciokrotnie określono wartość napięcia początkowego U_0 i napięcia przebicia U_p . Pomiary widm emisyjnych wykonano dla uśrednionej wartości odniesionej do U_0 i U_p .

Dla wyjaśnienia tej procedury przedstawiono przykład wyliczenia U_0 i U_p dla pierwszego układu z tablicy 4.3 i dla pierwszej przyjętej do pomiaru wartości napięcia, dla którego mierzono widma emisyjne z wykorzystaniem kamery UV. W tablicach 4.3-4.6 przedstawiono wartości napięć U , dla których wykonano pomiary z wykorzystaniem kamery UV w poszczególnych układach.

W ramach rozprawy do generacji WNZ przygotowano cztery układy izolacji ceramicznej, a mianowicie:

- walec porcelanowy wypełniony powietrzem typu WPP
- walec porcelanowy wypełniony kwarcem typu WPK
- izolator kołpakowy typu LK
- izolator długopniowy typu LS

Tablica 4.3

Zestawienie wartości napięć generacji WNZ w porcelanowym walcu izolacyjnym, wypełnionym powietrzem typu WPP.

L p	Odległość między elektrodami [cm]	Wartość napięcia zapłonu WNZ U_0 [kV]	Średnia wartość napięcia zapłonu WNZ $\overline{U_0}$ [kV]	Wartość napięcia przebicia U_p [kV]	Średnia wartość napięcia przebicia $\overline{U_p}$ [kV]	Zestawienie wartości napięć U , dla których określono widma emisyjne generowane przez WNZ [kV]
1	3	11,4 11,2 11,3 11,4 11,2	11,3	21,5 22,0 21,6 21,8 21,6	21,7	$0,53\overline{U_p}; 0,55\overline{U_p}; 0,57\overline{U_p}; 0,59\overline{U_p};$ $0,60\overline{U_p}; 0,62\overline{U_p}; 0,64\overline{U_p}; 0,65\overline{U_p};$ $0,66\overline{U_p}; 0,68\overline{U_p}; 0,70\overline{U_p}; 0,72\overline{U_p};$ $0,74\overline{U_p}; 0,75\overline{U_p}; 0,76\overline{U_p}; 0,78\overline{U_p};$ $0,80\overline{U_p}; 0,82\overline{U_p}; 0,84\overline{U_p}; 0,85\overline{U_p};$ $0,86\overline{U_p}; 0,88\overline{U_p}; 0,90\overline{U_p}; 0,91\overline{U_p};$ $0,92\overline{U_p}; 0,93\overline{U_p}.$
2	5	16,4 15,4 15,0 14,8 14,2	15,2	32,1 32,6 31,7 30,5 31,0	31,6	$0,50\overline{U_p}; 0,52\overline{U_p}; 0,54\overline{U_p}; 0,56\overline{U_p};$ $0,58\overline{U_p}; 0,60\overline{U_p}; 0,62\overline{U_p}; 0,64\overline{U_p};$ $0,65\overline{U_p}; 0,66\overline{U_p}; 0,68\overline{U_p}; 0,70\overline{U_p};$ $0,72\overline{U_p}; 0,73\overline{U_p}; 0,75\overline{U_p}; 0,76\overline{U_p};$ $0,77\overline{U_p}; 0,78\overline{U_p}; 0,79\overline{U_p}; 0,80\overline{U_p};$ $0,81\overline{U_p}; 0,82\overline{U_p}; 0,83\overline{U_p}; 0,84\overline{U_p};$ $0,85\overline{U_p}; 0,86\overline{U_p}; 0,87\overline{U_p}; 0,88\overline{U_p};$ $0,89\overline{U_p}; 0,90\overline{U_p}; 0,91\overline{U_p}; 0,92\overline{U_p}.$
3	7	19,5 20,9 20,7 20,9 21,1	20,6	41,6 41,8 40,6 41,0 41,6	41,3	$0,51\overline{U_p}; 0,52\overline{U_p}; 0,53\overline{U_p}; 0,55\overline{U_p};$ $0,57\overline{U_p}; 0,60\overline{U_p}; 0,62\overline{U_p}; 0,64\overline{U_p};$ $0,66\overline{U_p}; 0,68\overline{U_p}; 0,70\overline{U_p}; 0,71\overline{U_p};$ $0,72\overline{U_p}; 0,73\overline{U_p}; 0,74\overline{U_p}; 0,76\overline{U_p};$ $0,77\overline{U_p}; 0,78\overline{U_p}; 0,79\overline{U_p}; 0,80\overline{U_p};$ $0,82\overline{U_p}; 0,83\overline{U_p}; 0,84\overline{U_p}; 0,85\overline{U_p};$ $0,87\overline{U_p}; 0,88\overline{U_p}; 0,89\overline{U_p}; 0,90\overline{U_p};$ $0,91\overline{U_p}.$
4	9	21,8 22,5 22,6 20,4 19,1	21,3	51,3 50,9 50,2 51,1 49,0	50,5	$0,43\overline{U_p}; 0,45\overline{U_p}; 0,47\overline{U_p}; 0,49\overline{U_p};$ $0,50\overline{U_p}; 0,52\overline{U_p}; 0,54\overline{U_p}; 0,55\overline{U_p};$ $0,57\overline{U_p}; 0,58\overline{U_p}; 0,60\overline{U_p}; 0,62\overline{U_p};$ $0,64\overline{U_p}; 0,65\overline{U_p}; 0,66\overline{U_p}; 0,68\overline{U_p};$ $0,70\overline{U_p}; 0,72\overline{U_p}; 0,74\overline{U_p}; 0,75\overline{U_p};$ $0,76\overline{U_p}; 0,78\overline{U_p}; 0,80\overline{U_p}; 0,81\overline{U_p};$ $0,82\overline{U_p}; 0,83\overline{U_p}; 0,84\overline{U_p}; 0,85\overline{U_p};$ $0,86\overline{U_p}; 0,87\overline{U_p}; 0,88\overline{U_p}; 0,89\overline{U_p}.$
5	11	23,4 22,2 22,6 22,6 22,7	22,7	59,4 59,3 60,2 59,3 59,0	59,4	$0,40\overline{U_p}; 0,42\overline{U_p}; 0,44\overline{U_p}; 0,46\overline{U_p};$ $0,48\overline{U_p}; 0,50\overline{U_p}; 0,52\overline{U_p}; 0,54\overline{U_p};$ $0,56\overline{U_p}; 0,58\overline{U_p}; 0,60\overline{U_p}; 0,62\overline{U_p};$ $0,64\overline{U_p}; 0,66\overline{U_p}; 0,68\overline{U_p}; 0,70\overline{U_p};$ $0,72\overline{U_p}; 0,74\overline{U_p}; 0,76\overline{U_p}; 0,78\overline{U_p};$ $0,80\overline{U_p}; 0,82\overline{U_p}; 0,84\overline{U_p}; 0,85\overline{U_p}.$

Tablica 4.4

Zestawienie wartości napięć generacji WNZ w porcelanowym walcu izolacyjnym, wypełnionym kwarcem typu WPK.

Lp	Odległość między elektrodami [cm]	Wartość napięcia zapłonu WNZ U_0 [kV]	Średnia wartość napięcia zapłonu WNZ $\overline{U_0}$ [kV]	Wartość napięcia przebicia U_p [kV]	Średnia wartość napięcia przebicia $\overline{U_p}$ [kV]	Zestawienie wartości napięć U , dla których określono widma emisyjne generowane przez WNZ [kV]
1	3	10,4 10,2 9,7 9,6 9,4	9,9	20,1 21,7 21,3 21,5 20,5	21,0	$0,48\overline{U_p}$; $0,50\overline{U_p}$; $0,52\overline{U_p}$; $0,54\overline{U_p}$; $0,56\overline{U_p}$; $0,58\overline{U_p}$; $0,60\overline{U_p}$; $0,62\overline{U_p}$; $0,64\overline{U_p}$; $0,66\overline{U_p}$; $0,68\overline{U_p}$; $0,70\overline{U_p}$; $0,72\overline{U_p}$; $0,74\overline{U_p}$; $0,76\overline{U_p}$; $0,78\overline{U_p}$; $0,80\overline{U_p}$; $0,82\overline{U_p}$; $0,84\overline{U_p}$; $0,86\overline{U_p}$; $0,88\overline{U_p}$; $0,90\overline{U_p}$.
2	5	19,0 17,8 18,2 18,1 17,8	18,2	32,3 32,3 32,4 30,6 32,4	32,0	$0,56\overline{U_p}$; $0,58\overline{U_p}$; $0,60\overline{U_p}$; $0,62\overline{U_p}$; $0,64\overline{U_p}$; $0,66\overline{U_p}$; $0,68\overline{U_p}$; $0,70\overline{U_p}$; $0,71\overline{U_p}$; $0,72\overline{U_p}$; $0,73\overline{U_p}$; $0,74\overline{U_p}$; $0,75\overline{U_p}$; $0,76\overline{U_p}$; $0,77\overline{U_p}$; $0,78\overline{U_p}$; $0,79\overline{U_p}$; $0,80\overline{U_p}$.

Tablica 4.5

Zestawienie wartości napięć generacji WNZ na powierzchni ceramicznego izolatora kołpakowego typu LK.

Lp	Wartość napięcia zapłonu WNZ U_0 [kV]	Średnia wartość napięcia zapłonu WNZ $\overline{U_0}$ [kV]	Wartość napięcia przebicia U_p [kV]	Średnia wartość napięcia przebicia $\overline{U_p}$ [kV]	Zestawienie wartości napięć U , dla których określono widma emisyjne generowane przez WNZ [kV]
1	23,3 23,4 23,5 23,3 22,9	23,3	90,2 88,9 89,7 89,8 89,5	89,6	$0,26\overline{U_p}$; $0,28\overline{U_p}$; $0,30\overline{U_p}$; $0,32\overline{U_p}$; $0,34\overline{U_p}$; $0,36\overline{U_p}$; $0,38\overline{U_p}$; $0,40\overline{U_p}$; $0,42\overline{U_p}$; $0,43\overline{U_p}$; $0,44\overline{U_p}$; $0,46\overline{U_p}$; $0,48\overline{U_p}$; $0,50\overline{U_p}$; $0,52\overline{U_p}$; $0,54\overline{U_p}$; $0,56\overline{U_p}$; $0,58\overline{U_p}$; $0,60\overline{U_p}$; $0,62\overline{U_p}$; $0,64\overline{U_p}$; $0,66\overline{U_p}$; $0,68\overline{U_p}$; $0,70\overline{U_p}$; $0,72\overline{U_p}$; $0,74\overline{U_p}$; $0,76\overline{U_p}$; $0,78\overline{U_p}$; $0,80\overline{U_p}$; $0,82\overline{U_p}$; $0,84\overline{U_p}$; $0,86\overline{U_p}$; $0,88\overline{U_p}$.

Zestawienie wartości napięć generacji WNZ na powierzchni ceramicznego izolatora długopniowego typu LS.

Lp	Wartość napięcia zapłonu WNZ U_0 [kV]	Średnia wartość napięcia zapłonu WNZ $\overline{U_0}$ [kV]	Wartość napięcia przebicia U_p [kV]	Średnia wartość napięcia przebicia $\overline{U_p}$ [kV]	Zestawienie wartości napięć U , dla których określono widma emisyjne generowane przez WNZ [kV]
1	12,5 12,4 11,2 11,8 12,2	12,0	39,5 40,7 40,1 40,2 40,0	40,1	$0,32\overline{U_p}; 0,35\overline{U_p}; 0,38\overline{U_p}; 0,40\overline{U_p};$ $0,42\overline{U_p}; 0,45\overline{U_p}; 0,48\overline{U_p}; 0,50\overline{U_p};$ $0,52\overline{U_p}; 0,55\overline{U_p}; 0,58\overline{U_p}; 0,60\overline{U_p};$ $0,62\overline{U_p}; 0,64\overline{U_p}; 0,66\overline{U_p}; 0,68\overline{U_p};$ $0,70\overline{U_p}; 0,72\overline{U_p}; 0,74\overline{U_p}; 0,76\overline{U_p};$ $0,78\overline{U_p}; 0,80\overline{U_p}; 0,82\overline{U_p}; 0,84\overline{U_p};$ $0,86\overline{U_p}; 0,88\overline{U_p}; 0,90\overline{U_p}; 0,92\overline{U_p};$ $0,93\overline{U_p}; 0,94\overline{U_p}; 0,95\overline{U_p}.$

4.6. Numeryczne metody opracowania wyników pomiarów

4.6.1. Analizy dotyczące metody optycznej w wykorzystaniu kamery UV

Uzyskane wyniki pomiarów widm emisyjnych poddano analizom statystycznym w celu określenia różnic i podobieństw między sygnałami oraz w celu określenia wpływu wartości napięć generacji WNZ na uzyskiwane widma emisyjne. Zarejestrowane charakterystyki poddano procesowi regresji matematycznej [28, 149, 155]. Poniżej opisano kolejno wykorzystane metody analizy sygnałów.

I. Zobrazowano natężenie emisji świetlnej w zależności od czasu rejestracji dla różnych napięć generacji WNZ oraz to samo zobrazowano na zbiorczym wykresie dla wszystkich dobranych napięć generacji WNZ.

II. Obliczono średnie arytmetyczne μ w funkcji napięcia generacji WNZ. Średnia arytmetyczna jest klasyczną miarą położenia rozkładu oraz miarą tendencji centralnej.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4.1)$$

gdzie: y_i - i -ta wartość empirycznej zmiennej zależnej, n - liczba danych, dla których wyliczana jest średnia μ .

III. Obliczono wariancję s w funkcji napięcia generacji WNZ. Wariancja jest klasyczną miarą zmienności.

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \quad (4.2)$$

gdzie: y_i - i -ta wartość empirycznej zmiennej zależnej, μ - średnia arytmetyczna, n - liczba danych, dla których wyliczana jest wariancja s .

IV. Obliczono histogramy obrazujące liczebność zmiennej *liczba zliczeń* - L . Histogram jest graficznym sposobem przedstawienia rozkładu empirycznego, który wyznacza się przez obliczenie szeregu rozdzielczego.

V. Określono stochastyczności liczebności zmiennej *liczba zliczeń* - L . Zjawisko występowania WNZ powierzchniowych jest z założenia stochastyczne. Dla potwierdzenia tego założenia przeprowadzono analizę z zastosowaniem dwóch rodzajów funkcji gęstości prawdopodobieństwa: symetrycznego rozkładu Gaussa (wzór 4.3) i asymetrycznego rozkładu GEV (wzór 4.4) [35]. Analizę wykonano z wykorzystaniem regresji matematycznej, w tym algorytmu MVUE [28, 149, 155], w której estymowano parametry obu funkcji.

$$F. Gaussa(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2} \quad (4.3)$$

gdzie: x = histogram(L), μ - średnia arytmetyczna, σ - wariancja.

$$F. GEV(x) = \frac{1}{\sigma} * e^{\left(-\left(1+k\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right)\left(1+k\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}}} \quad (4.4)$$

gdzie: x = histogram(L), μ - parametr określający lokalizację, σ - parametr określający skalę, k - parametr określający kształt.

VI. Na podstawie danych uzyskanych z procesu regresji obliczono wartości współczynników determinacji R^2 (wzór 4.5), który jest kwadratem współczynnika korelacji Pearsona. Wartości tych współczynników przedstawiono w sposób graficzny w zależności do napięcia generacji WNZ.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)(\tilde{x}_i - \tilde{\mu})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i - \tilde{\mu})^2}} \right)^2 \quad (4.5)$$

gdzie: x_i - i -ta wartość empirycznej zmiennej zależnej, \tilde{x}_i - i -ta wartość rozpatrywanego rozkładu, μ - średnia arytmetyczna empirycznej zmiennej zależnej, $\tilde{\mu}$ - średnia arytmetyczna z rozpatrywanego rozkładu.

Współczynnik determinacji R^2 jest jedną z podstawowych miar jakości dopasowania modelu. Informuje o tym, jaka część zmienności zmiennej objaśnianej została wyjaśniona przez model. Jest on miarą stopnia, w jakim model wyjaśnia kształtowanie się zmiennej objaśnianej. Można również powiedzieć, że współczynnik determinacji opisuje tę część

zmienności objaśnianej, która wynika z jej zależności od uwzględnionych w modelu zmiennych objaśniających. Współczynnik determinacji przyjmuje wartości z przedziału [0-1] jeśli w modelu występuje wyraz wolny, a do estymacji parametrów wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Poniżej przedstawiono zastosowany sposób interpretacji wartości tego współczynnika:

0,0 - 0,5 - dopasowanie niezadowalające,
 0,5 - 0,6 - dopasowanie słabe,
 0,6 - 0,8 - dopasowanie zadowalające,
 0,8 - 0,9 - dopasowanie dobre,
 0,9 - 1,0 - dopasowanie bardzo dobre.

Dopasowanie modelu jest tym lepsze, im wartość R^2 jest bliższa jedności.

VII. Określono dystrybuanty empiryczne (częstości skumulowane) dla obu uzyskanych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa. Dystrybuanta (wzór 4.6), jest miarą probabilistyczną pozwalającą na wyznaczenie rozkładu prawdopodobieństwa.

$$D_n(x) = \sum_{\forall i: x_i \leq x} \frac{n_i}{n} \quad (4.6)$$

VIII. Określono zależność zmiennej *liczba zliczeń* L w funkcji napięcia generacji WNZ i wyznaczono model matematyczny opisujący charakter uzyskanej krzywej. W tym celu wykorzystano model MP zdefiniowany równaniem 4.7. W procesie regresji wykorzystano metodę MNK i metodę Nelder-Mead'a [85] do poszukiwania optymalnych parametrów rozpatrywanej funkcji, tj. takich, które zapewniają minimalne wartości odchyżeń między danymi teoretycznymi i empirycznymi. Funkcję celu stanowiła norma reszt δ (wzór 4.8).

$$MP(L) = A * L^B + C \quad (4.7)$$

gdzie: L -liczba zliczeń, A, B, C - parametry modelu.

$$\delta = \sqrt{\sum_{\forall i} (x_i - \tilde{x}_i)^2} \quad (4.8)$$

gdzie: x_i - i -ta wartość zmiennej empirycznej, \tilde{x}_i - i -ta wartość zmiennej teoretycznej (estymowanej).

IX. Określono wpływ napięcia generacji WNZ na zmienną *liczba zliczeń* L i wyznaczono model matematyczny opisujący charakter uzyskanej krzywej. W tym celu wykorzystano model MG zdefiniowany równaniem 4.9.

$$MG(L) = A * e^{-\left(\frac{L-B}{C}\right)^2} \quad (4.9)$$

gdzie: L -liczba zliczeń, A, B, C - parametry modelu.

X. Obliczono wartości współczynników będących miarami dopasowania rozpatrywanych modeli do badanych zależności, w tym SSE (wzór 4.10), RMSE (wzór 4.11), R-square (wzór 4.12) i adj-R-square (wzór 4.13).

a. **SSE** jest to suma kwadratów reszt. Określa całkowite odchylenie wartości estymowanych od wartości empirycznych. Wartość bliska zera wskazuje, że model ma mniejszy składnik błędu losowego, a dopasowanie może być bardziej użyteczne do celów predykcji.

$$SSE = \sum_{v_i} (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (4.10)$$

gdzie: y_i - i -ta wartość zmiennej empirycznej, \tilde{y}_i - i -ta wartość zmiennej teoretycznej (estymowanej).

b. **RMSE** jest standardowym błędem regresji stanowiącym pierwiastek z błędu średniokwadratowego. Wartość bliska jedności oznacza większą użyteczność rozpatrywanego modelu do celów predykcji.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{v_i} (y_i - \tilde{y}_i)^2}{n - p}} \quad (4.11)$$

gdzie: y_i - i -ta wartość zmiennej empirycznej, \tilde{y}_i - i -ta wartość zmiennej teoretycznej (estymowanej), n - liczba próbek zawartych w estymowanym przebiegu/zależności, p - liczba parametrów modelu.

c. **R-square (R^2)** określa zmienność danych. Wartość ta stanowi kwadrat korelacji między wartościami empirycznymi i estymowanymi. Wartości w pobliżu jedności wskazują, że większa część wariancji jest zawarta w modelu.

$$R - square = 1 - \frac{\sum_{v_i} (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{v_i} (y_i - \mu)^2} \quad (4.12)$$

gdzie: y_i - i -ta wartość zmiennej empirycznej, \tilde{y}_i - i -ta wartość zmiennej teoretycznej (estymowanej), μ - średnia arytmetyczna z danych empirycznych.

d. **Adj-R-square ($adj-R^2$)** jest to skorygowany o liczbę stopni swobody współczynnik determinacji. Jest on wskaźnikiem umożliwiającym porównanie wyników uzyskanych przez modele o różnej liczbie parametrów. Wartości zawierają się w zakresie poniżej jedności. Wartości bliskie jedności oznaczają dobre dopasowanie modelu do danych empirycznych. Wartości ujemne oznaczają, że model zawiera składniki, które nie pomagają w predykcji odpowiedzi modelu.

$$adj - R - square = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(n-p)} \quad (4.13)$$

gdzie: n - liczba próbek zawartych w estymowanym przebiegu/zależności, p - liczba parametrów modelu.

$$SST = \sum_{\forall i} (y_i - \mu)^2 \quad (4.14)$$

gdzie: y_i - i -ta wartość zmiennej empirycznej, μ - średnia arytmetyczna z danych empirycznych.

e. **Dfe** stanowi liczbę próbek wykorzystanych w procesie regresji pomniejszoną o liczbę parametrów model.

$$dfe = n - p \quad (4.15)$$

gdzie: n - liczba próbek zawartych w estymowanym przebiegu/zależności, p - liczba parametrów modelu.

XI. Określono wartości napięcia początkowego U_{01} , które wyznaczono na podstawie odczytu wartości wskazywanej przez woltomierz w chwili, gdy zarejestrowana liczba zliczeń przekraczała wartość 300, a następnie liczba zliczeń rosła w sposób lawinowy.

4.6.2 Analizy dotyczące wyników metody optycznej w wykorzystaniem spektrofotometru

I. Zobrazowano widma intensywności emisji świetlnej dla różnych napięć generacji WNZ oraz to samo na zbiorczym wykresie dla wszystkich badanych napięć.

II. Obliczono histogramy obrazujące liczebność zmiennej *intensywność promieniowania* I dla poszczególnych długości fal. Histogram jest graficznym sposobem przedstawienia rozkładu empirycznego, który wyznacza się poprzez obliczenie szeregu rozdzielczego. Histogramy przedstawiono na zbiorczym wykresie obrazującym zależność uzyskanych wartości od napięcia generacji WNZ.

III. Określono zakresy długości fal dla emisji świetlnej o największej intensywności. Wartości te są zależne od napięcia generacji WNZ i rodzaju badanego układu izolacyjnego.

IV. Określono składowe widma liniowego z wykorzystaniem szeregu funkcji Gaussa. Opracowane procedury wykorzystują metodę Nelder-Mead'a [85] do poszukiwania optymalnych parametrów rozpatrywanej funkcji, tj. takich, które zapewniają minimalne wartości odchyleń między danymi teoretycznymi i empirycznymi. Efektem końcowym jest suma składowych widmowych w postaci zależności oznaczonej jako M2 (wzór 4.16).

$$M2(\lambda) = \sum_{i=1}^N A_i * e^{-\left(\frac{\lambda-B_i}{C_i}\right)^2} \quad (4.16)$$

gdzie: λ - zmienna niezależna - długość fali, A_i - amplituda składowej (prążka w widmie) o szerokości C , N - zmienna liczba składowych w modelu, A, B, C - parametry modelu.

V. W celu określenia najbardziej dominujących składowych widma liniowego opracowano matematyczny model M1, opisany zależnością 4.17. Model M1 stanowi sumę ośmiu funkcji Gaussa.

$$M1(\lambda) = \sum_{i=1}^8 A_i * e^{-\left(\frac{\lambda-B_i}{C_i}\right)^2} \quad (4.17)$$

gdzie: λ - zmienna niezależna - długość fali, A_i - amplituda składowej (prążka w widmie) o szerokości C , A, B, C - parametry modelu.

VI. Modele M1 i M2 pomimo pozornego podobieństwa różnią się zasadniczo ilością parametrów i sposobem estymacji parametrów. W rozprawie przedstawiono obliczone w procesie regresji obu modeli współczynniki dopasowania, tj. *SSE*, *R-square* i *RMSE* w postaci trójwymiarowych wykresów obrazujących zależność od wartości napięcia generacji WNZ.

VII. Wartości parametrów modeli M1 i M2 przedstawiono w postaci trójwymiarowych wykresów obrazujących zależność od wartości napięcia generacji WNZ. Następnie uśredniono uzyskane wielkości i przedstawiono na wykresach słupkowych w celach porównawczych.

VIII. Określono wartości napięcia początkowego U_{01} , które wyznaczono na podstawie odczytu wartości wskazywanej przez woltomierz w chwili, gdy zarejestrowana intensywność emisji świetlnej przekraczała wartość 1000.

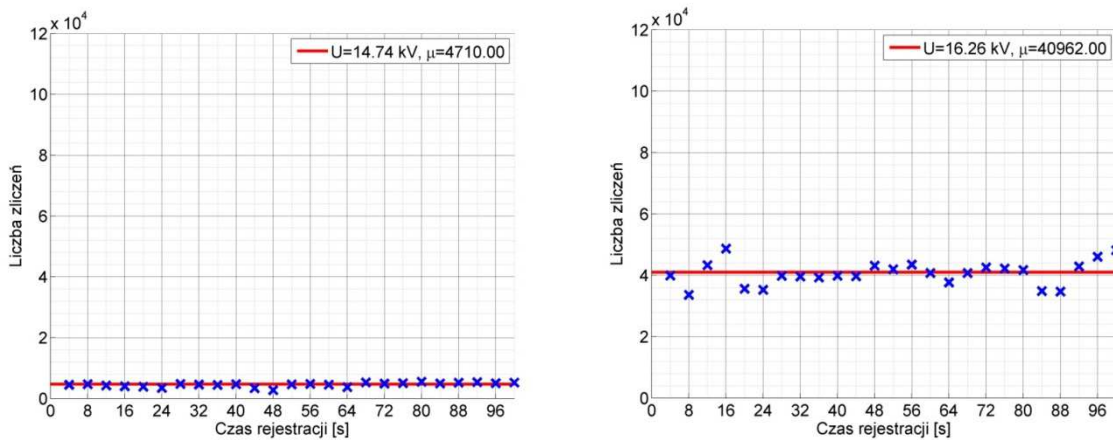
5. Wyniki pomiarów emisji świetlnej zarejestrowanej kamerą w zakresie UV

5.1. Natężenie emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni walca izolacyjnego z porcelany wypełnionego powietrzem przy różnych napięciach i różnych odległościach między elektrodami

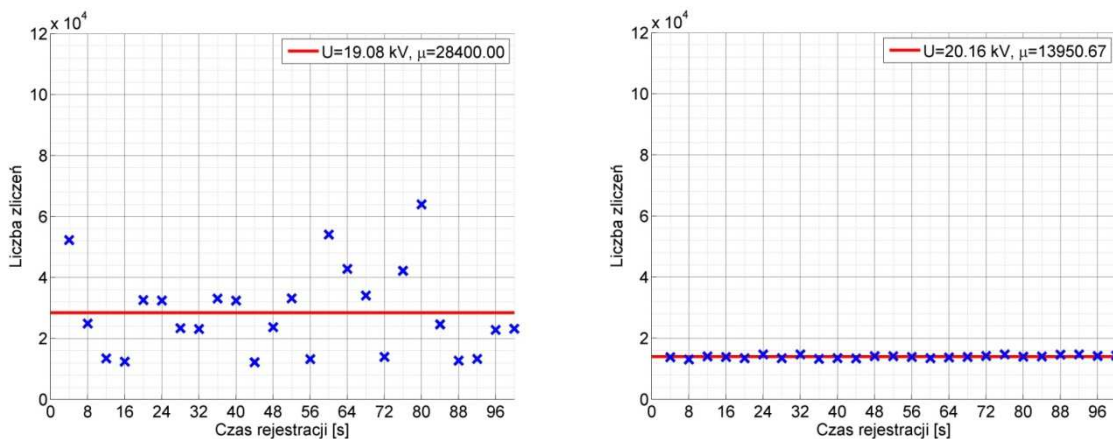
5.1.1. Odległość między elektrodami 3 cm

Na rys. 5.1-5.2 przedstawiono zarejestrowane wartości zmiennej *liczba zliczeń* która koresponduje z liczbą punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na

powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji WNZ. Niebieskim krzyżykiem zaznaczono wartości uzyskane w trakcie pomiarów, a czerwoną linią - wartość średniej arytmetycznej.

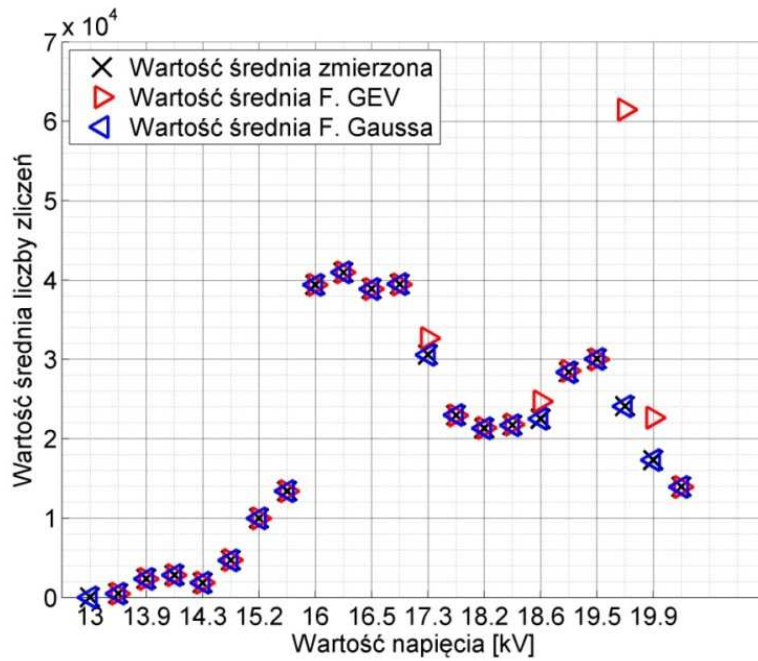


Rys. 5.1 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu $0,68U_p = 14,74$ kV (po lewej), $0,75 U_p = 16,26$ kV (po prawej).



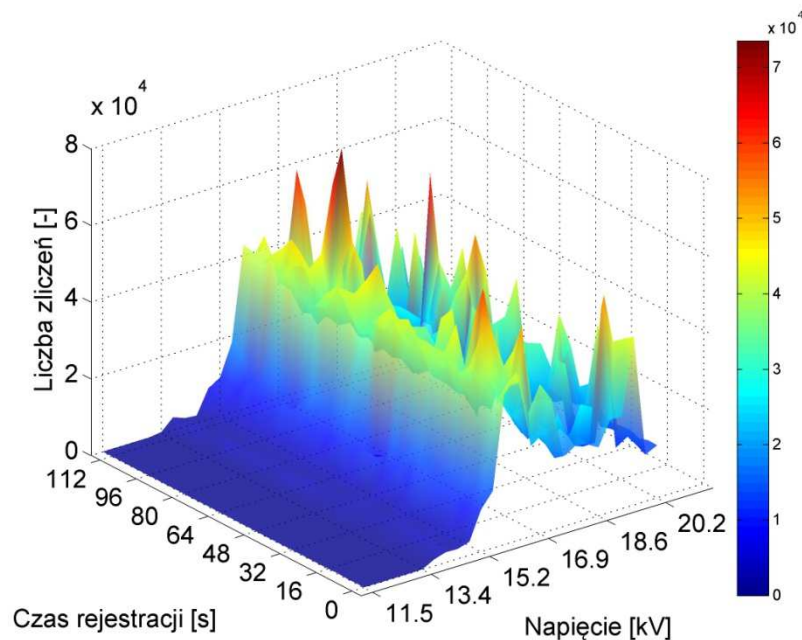
Rys. 5.2 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu $0,88 U_p = 19,08$ kV (po lewej), $0,93 U_p = 20,16$ kV (po prawej).

Na rys. 5.3 przedstawiono w funkcji napięcia generacji WNZ wartości średnich arytmetycznych, obliczonych ze wzoru (4.1), dla sygnałów zarejestrowanych w pomiarach i dla obliczonych na podstawie estymat funkcji GEV i Gaussa wartości zmiennej *liczba zliczeń*. Czarnym krzyżykiem zaznaczono średnie obliczone z wartości pomiarowych, czerwonym trójkątem - średnie obliczone dla F. GEV, niebieskim trójkątem - średnie dla F. Gaussa.



Rys. 5.3 Zależność liczby punktów emisyjnych (wartości średnie) emitowanych przez WNZ generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ.

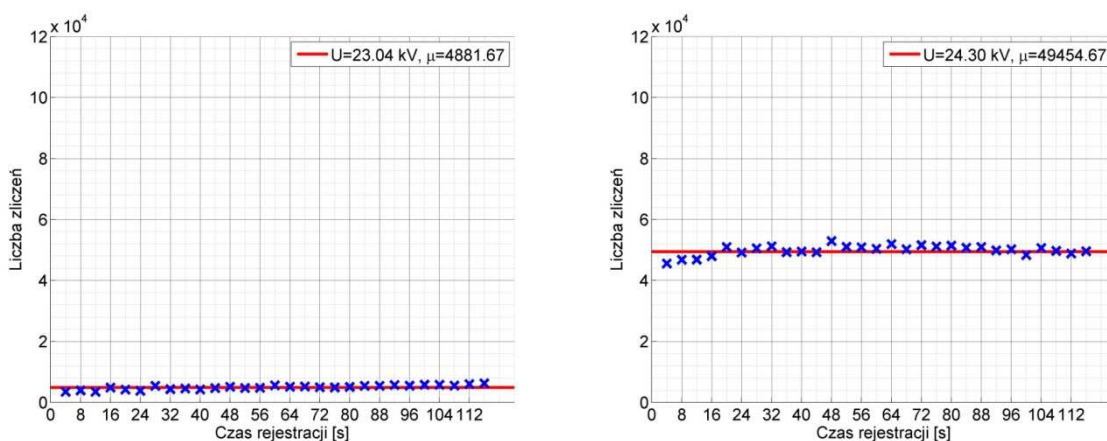
Na rys. 5.4 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości dotyczące liczby punktów emisyjnych generowanych przez WNZ występujące na powierzchni ceramicznego walca, przy odległości między elektrodami 3 cm.



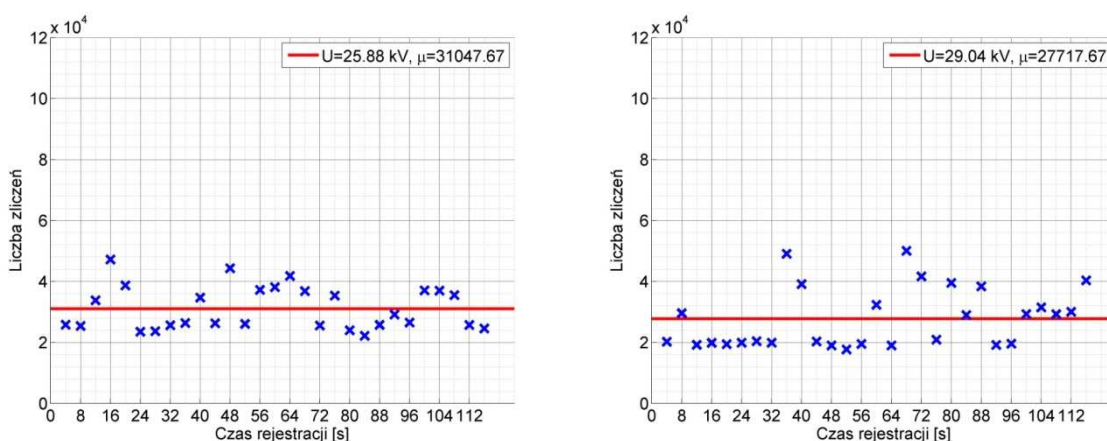
Rys. 5.4 Zależność liczby punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ, wszystkie zarejestrowane wartości.

5.1.2. Odległość między elektrodami 5 cm

Na rys. 5.5-5.6 przedstawiono zarejestrowane wartości zmiennej *liczba zliczeń* która koresponduje z liczbą punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji WNZ. Niebieskim krzyżykiem zaznaczono wartości uzyskane w trakcie pomiarów, a czerwoną linią - wartość średniej arytmetycznej.

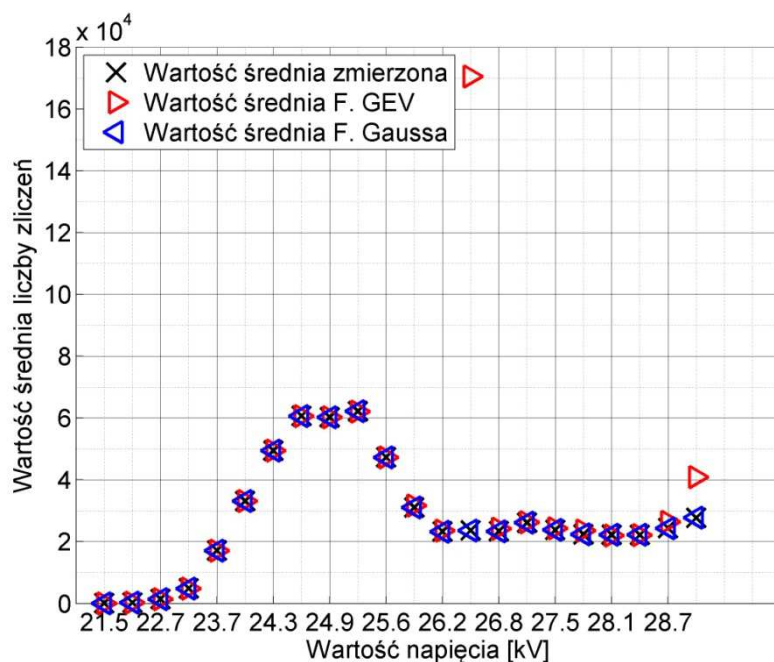


Rys. 5.5 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu $0,73 U_p = 23,04$ kV (po lewej), $0,77 U_p = 24,30$ kV (po prawej).



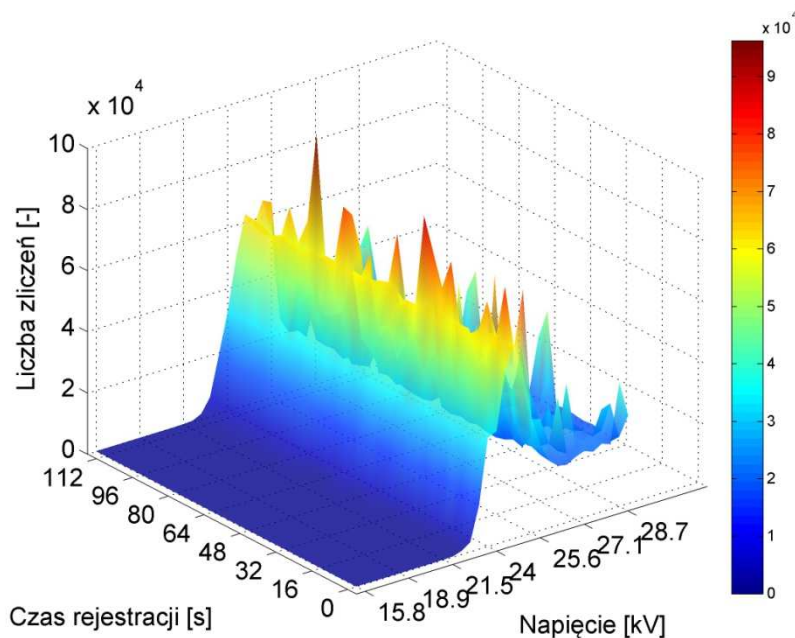
Rys. 5.6 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu $0,82 U_p = 25,88$ kV (po lewej), $0,92 U_p = 29,04$ kV (po prawej).

Na rys. 5.7 przedstawiono w funkcji napięcia generacji WNZ wartości średnich arytmetycznych, obliczonych ze wzoru (4.1), dla zarejestrowanych w pomiarach i dla obliczonych na podstawie estymat funkcji GEV i Gaussa wartości zmiennej *liczba zliczeń*. Czarnym krzyżykiem zaznaczono średnie obliczone z wartości pomiarowych, czerwonym trójkątem - średnie obliczone dla F. GEV, niebieskim trójkątem - średnie dla F. Gaussa.



Rys. 5.7 Zależność liczby punktów emisyjnych (wartości średnie) emitowanych przez WNZ generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ.

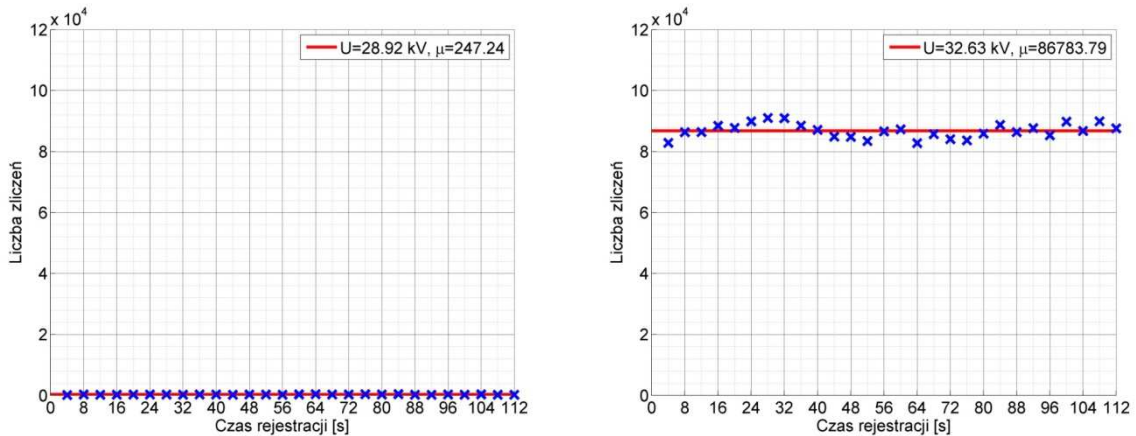
Na rys. 5.8 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości dotyczące liczby punktów emisyjnych generowanych przez WNZ występujące na powierzchni ceramicznego walca, przy odległości między elektrodami 5 cm.



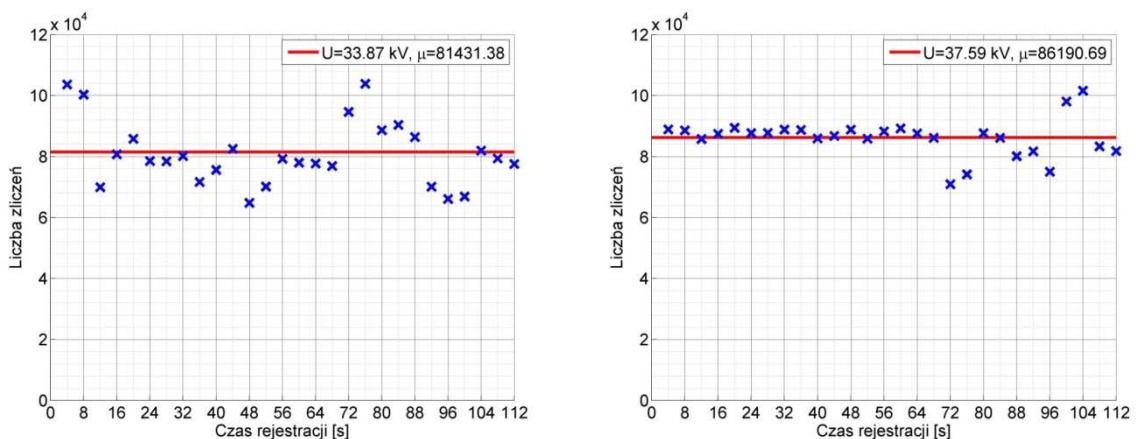
Rys. 5.8 Zależność liczby punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ, wszystkie zarejestrowane wartości.

5.1.3. Odległość między elektrodami 7 cm

Na rys. 5.9-5.10 przedstawiono zarejestrowane wartości zmiennej *liczba zliczeń* która koresponduje z liczbą punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji WNZ. Niebieskim krzyżykiem zaznaczono wartości uzyskane w trakcie pomiarów, a czerwoną linią - wartość średniej arytmetycznej.

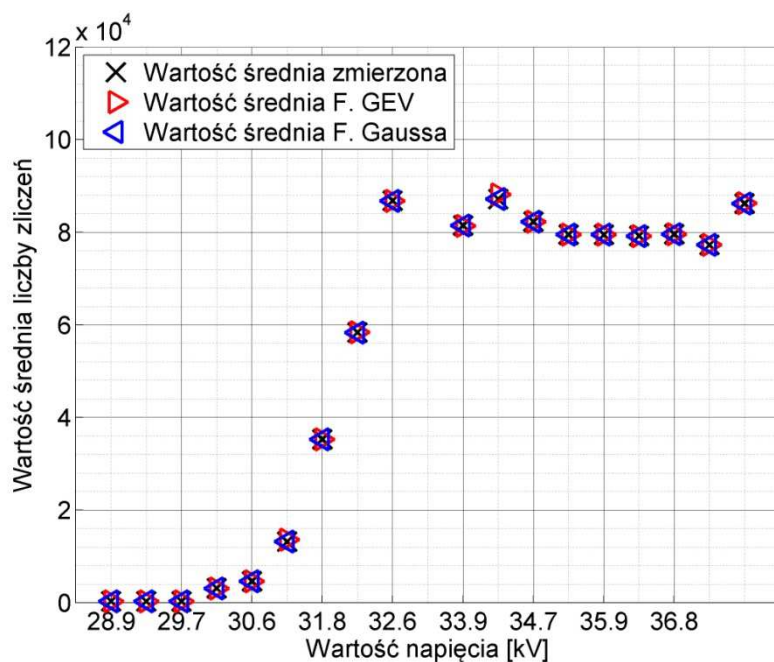


Rys. 5.9 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu 0,70 $U_p= 28,92$ kV (po lewej), 0,79 $U_p= 32,63$ kV (po prawej).



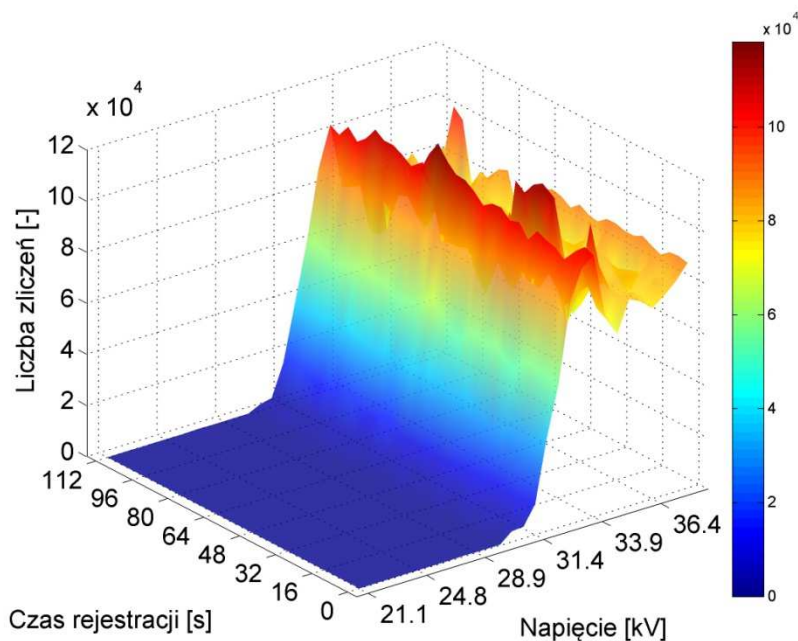
Rys. 5.10 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu 0,82 $U_p= 33,87$ kV (po lewej), 0,91 $U_p= 37,59$ kV (po prawej).

Na rys. 5.11 przedstawiono w funkcji napięcia generacji WNZ wartości średnich arytmetycznych, obliczonych ze wzoru (4.1), dla zarejestrowanych w pomiarach i dla obliczonych na podstawie estymat funkcji GEV i Gaussa wartości zmiennej *liczba zliczeń*. Czarnym krzyżykiem zaznaczono średnie obliczone z wartości pomiarowych, czerwonym trójkątem - średnie obliczone dla F. GEV, niebieskim trójkątem - średnie dla F. Gaussa.



Rys. 5.11 Zależność liczby punktów emisyjnych (wartości średnie) emitowanych przez WNZ generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ.

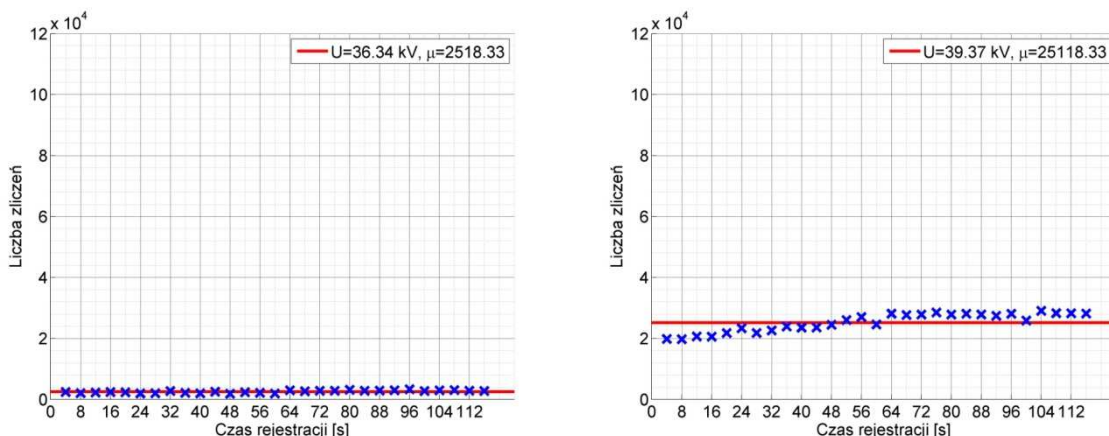
Na rys. 5.12 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości dotyczące liczby punktów emisyjnych generowanych przez WNZ występujące na powierzchni ceramicznego walca, przy odległości między elektrodami 7 cm.



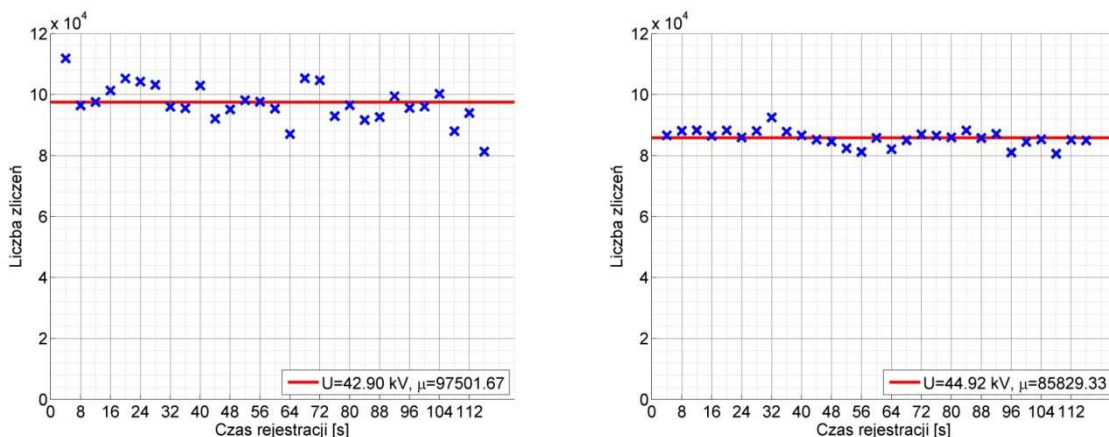
Rys. 5.12 Zależność liczby punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ, wszystkie zarejestrowane wartości.

5.1.4. Odległość między elektrodami 9 cm

Na rys. 5.13-5.14 przedstawiono zarejestrowane wartości zmiennej *liczba zliczeń* która koresponduje z liczbą punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji WNZ. Niebieskim krzyżykiem zaznaczono wartości uzyskane w trakcie pomiarów, a czerwoną linią - wartość średniej arytmetycznej.

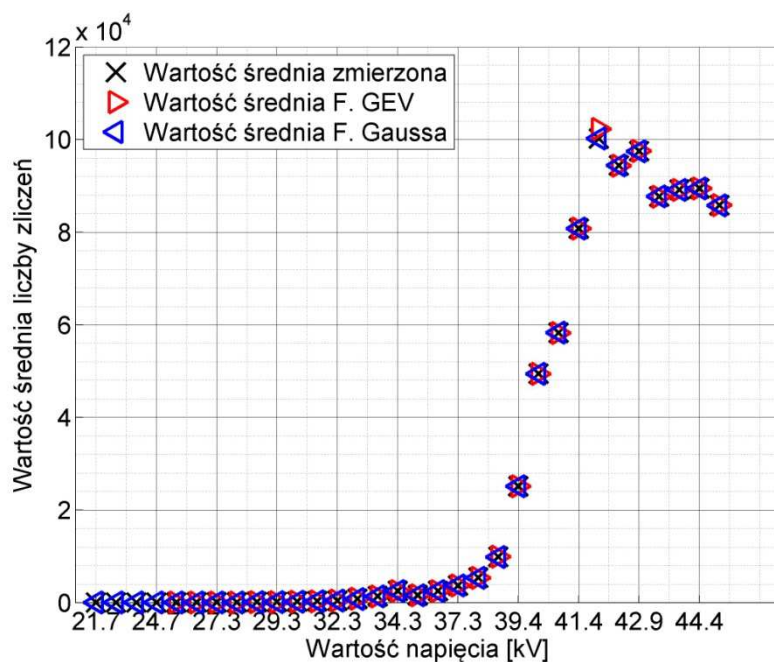


Rys. 5.13 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu $0,72 U_p = 36,34$ kV (po lewej), $0,78 U_p = 39,37$ kV (po prawej).



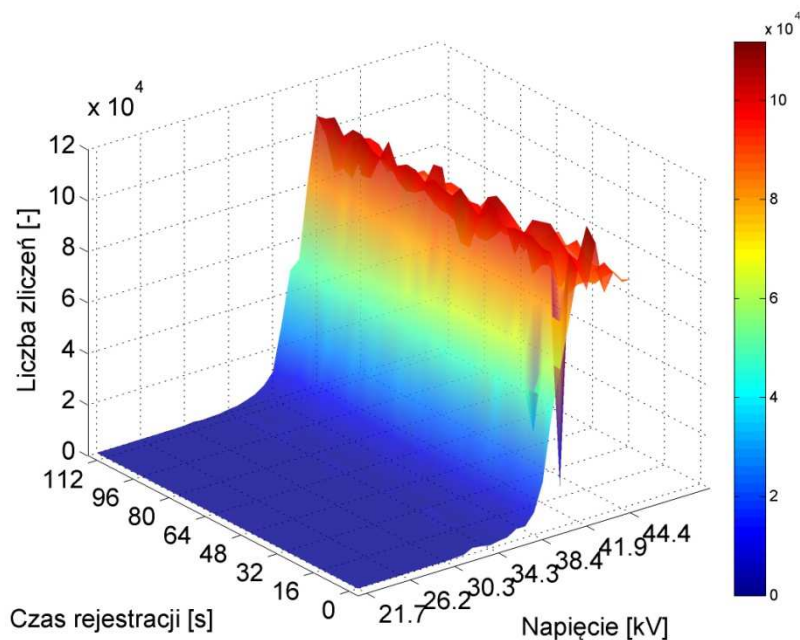
Rys. 5.14 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu $0,85 U_p = 42,90$ kV (po lewej), $0,89 U_p = 44,92$ kV (po prawej).

Na rys. 5.15 przedstawiono w funkcji napięcia generacji WNZ wartości średnich arytmetycznych, obliczonych ze wzoru (4.1), dla zarejestrowanych w pomiarach i dla obliczonych na podstawie estymat funkcji GEV i Gaussa wartości zmiennej *liczba zliczeń*. Czarnym krzyżykiem zaznaczono średnie obliczone z wartości pomiarowych, czerwonym trójkątem - średnie obliczone dla F. GEV, niebieskim trójkątem - średnie dla F. Gaussa.



Rys. 5.15 Zależność liczby punktów emisyjnych (wartości średnie) emitowanych przez WNZ generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ.

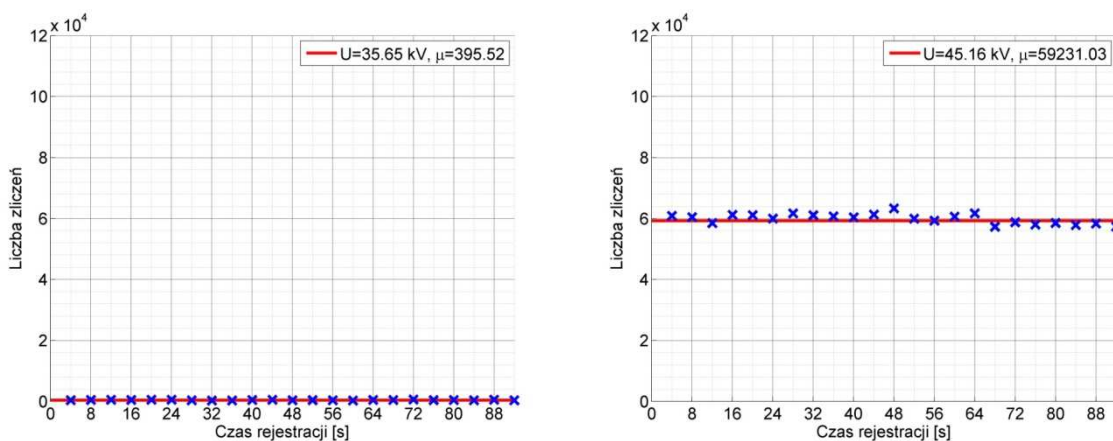
Na rys. 5.16 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości dotyczące liczby punktów emisyjnych generowanych przez WNZ występujące na powierzchni ceramicznego walca, przy odległości między elektrodami 9 cm.



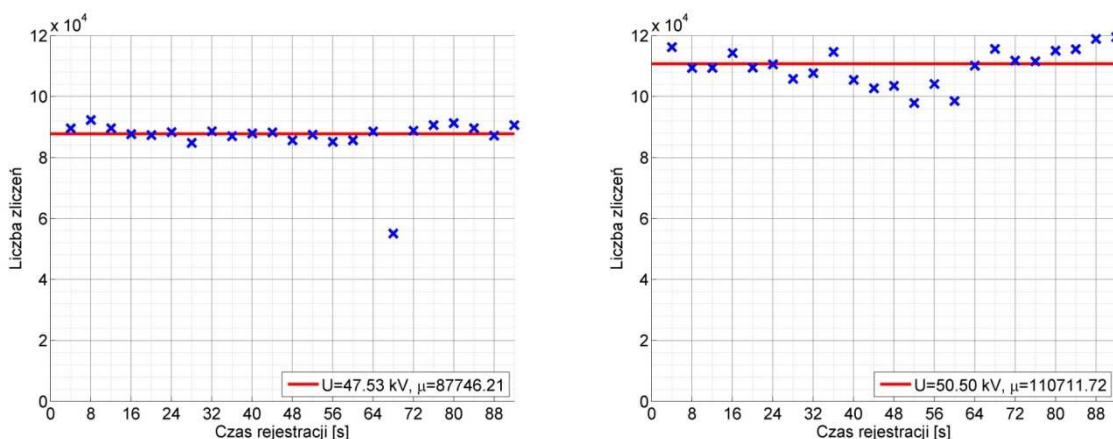
Rys. 5.16 Zależność liczby punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ, wszystkie zarejestrowane wartości.

5.1.5. Odległość między elektrodami 11 cm

Na rys. 5.17-5.18 przedstawiono zarejestrowane wartości zmiennej *liczba zliczeń* która koresponduje z liczbą punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji WNZ. Niebieskim krzyżykiem zaznaczono wartości uzyskane w trakcie pomiarów, a czerwoną linią - wartość średniej arytmetycznej.

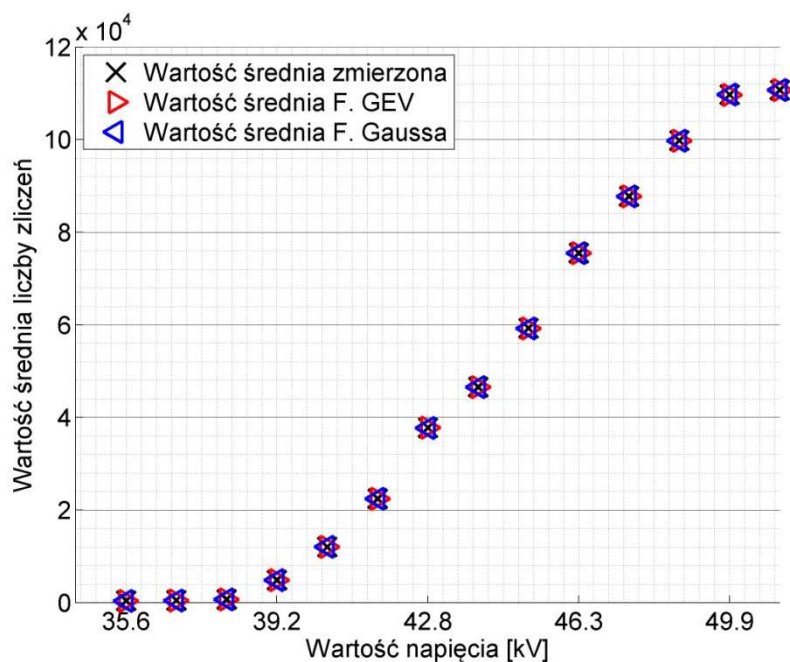


Rys. 5.17 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu $0,60 U_p= 35,65 \text{ kV}$ (po lewej), $0,76 U_p= 45,16 \text{ kV}$ (po prawej).



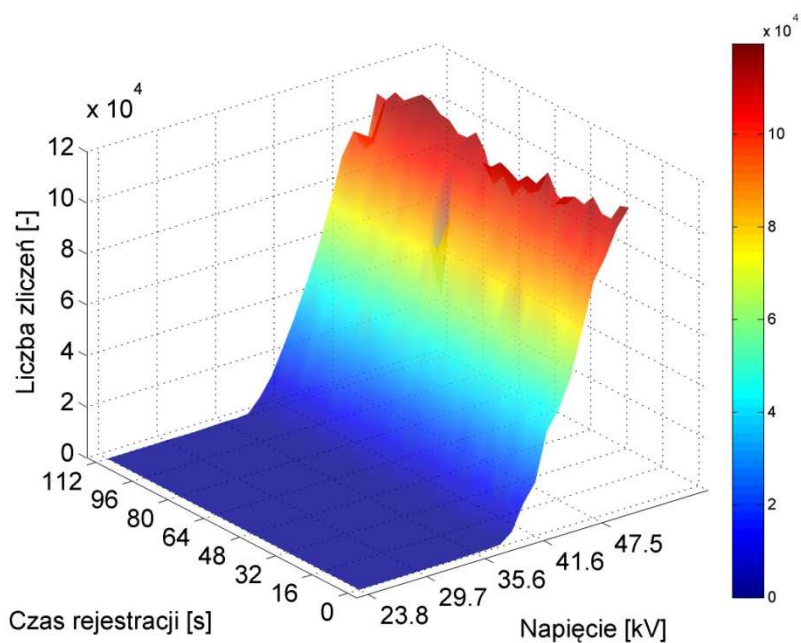
Rys. 5.18 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego powietrzem, przy napięciu $0,80 U_p= 47,53 \text{ kV}$ (po lewej), $0,85 U_p= 50,50 \text{ kV}$ (po prawej).

Na rys. 5.19 przedstawiono w funkcji napięcia generacji WNZ wartości średnich arytmetycznych, obliczonych ze wzoru (4.1), dla zarejestrowanych w pomiarach i dla obliczonych na podstawie estymat funkcji GEV i Gaussa wartości zmiennej *liczba zliczeń*. Czarnym krzyżykiem zaznaczono średnie obliczone z wartości pomiarowych, czerwonym trójkątem - średnie obliczone dla F. GEV, niebieskim trójkątem - średnie dla F. Gaussa.



Rys. 5.19 Zależność liczby punktów emisyjnych (wartości średnie) emitowanych przez WNZ generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ.

Na rys. 5.20 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości dotyczące liczby punktów emisyjnych generowanych przez WNZ występujące na powierzchni ceramicznego walca, przy odległości między elektrodami 11 cm.

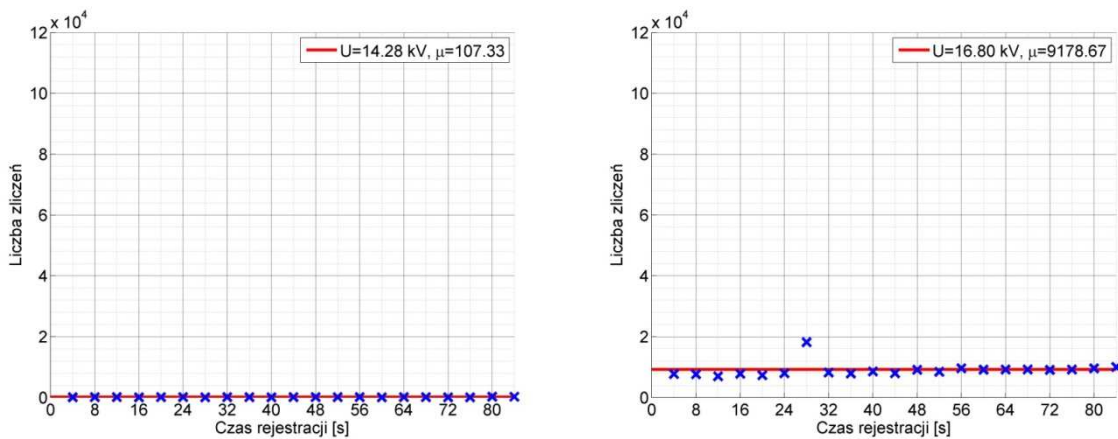


Rys. 5.20 Zależność liczby punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym powietrzem, od wartości napięcia generacji WNZ, wszystkie zarejestrowane wartości.

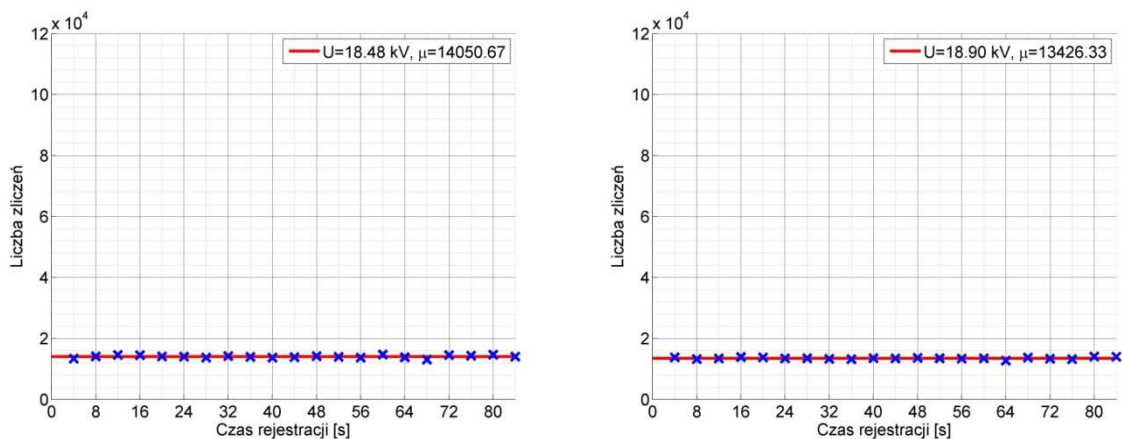
5.2. Natężenie emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni walca izolacyjnego z porcelany wypełnionego dielektrykiem kwarcowym przy różnych napięciach i różnych odległościach między elektrodami

5.2.1. Odległość między elektrodami 3 cm

Na rys. 5.21-5.22 przedstawiono zarejestrowane wartości zmiennej *liczba zliczeń* która koresponduje z liczbą punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji WNZ. Niebieskim krzyżykiem zaznaczono wartości uzyskane w trakcie pomiarów, a czerwoną linią - wartość średniej arytmetycznej.



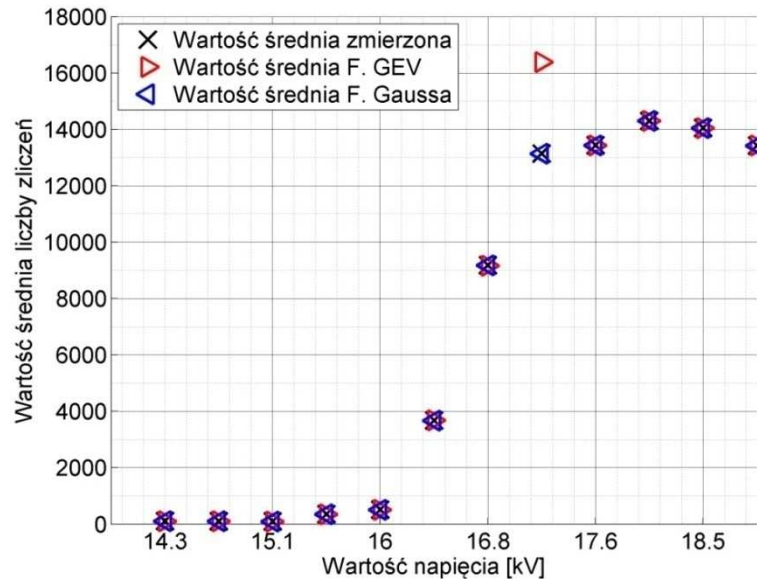
Rys. 5.21 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, przy napięciu 0,68 $U_p= 14,28$ kV (po lewej), 0,80 $U_p= 16,80$ kV (po prawej).



Rys. 5.22 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, przy napięciu 0,88 $U_p= 18,48$ kV (po lewej), 0,90 $U_p= 18,90$ kV (po prawej).

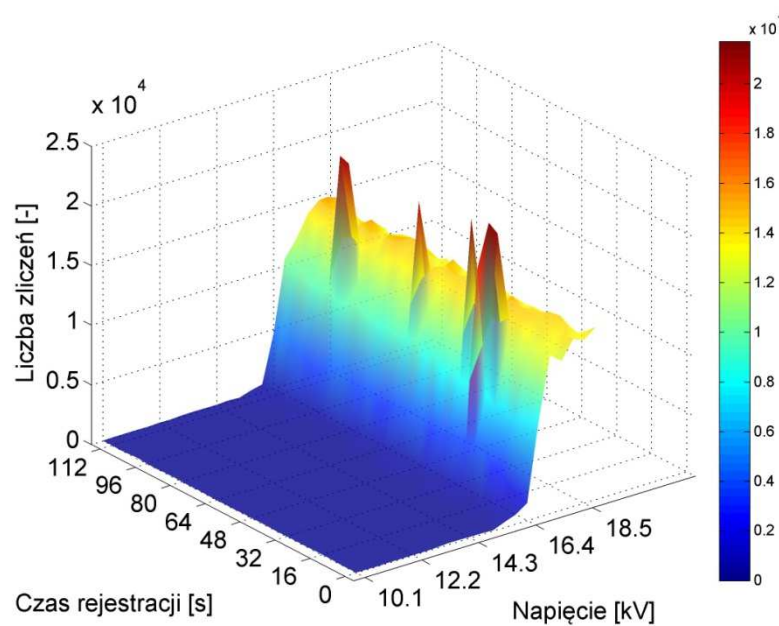
Na rys. 5.23 przedstawiono w funkcji napięcia generacji WNZ wartości średnich arytmetycznych, obliczonych ze wzoru (4.1), dla zarejestrowanych w pomiarach i dla

obliczonych na podstawie estymat funkcji GEV i Gaussa wartości zmiennej *liczba zliczeń*. Czarnym krzyżykiem zaznaczono średnie obliczone z wartości pomiarowych, czerwonym trójkątem - średnie obliczone dla F. GEV, niebieskim trójkątem - średnie dla F. Gaussa.



Rys. 5.23 Zależność liczby punktów emisyjnych (wartości średnie) emitowanych przez WNZ generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem, od wartości napięcia generacji WNZ.

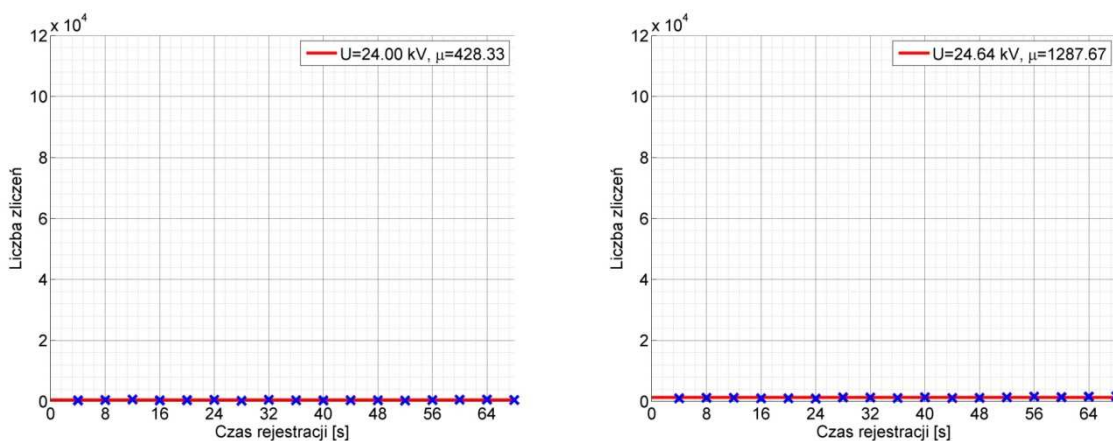
Na rys. 5.24 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości dotyczące liczby punktów emisyjnych generowanych przez WNZ występujące na powierzchni ceramicznego walca, przy odległości między elektrodami 3cm.



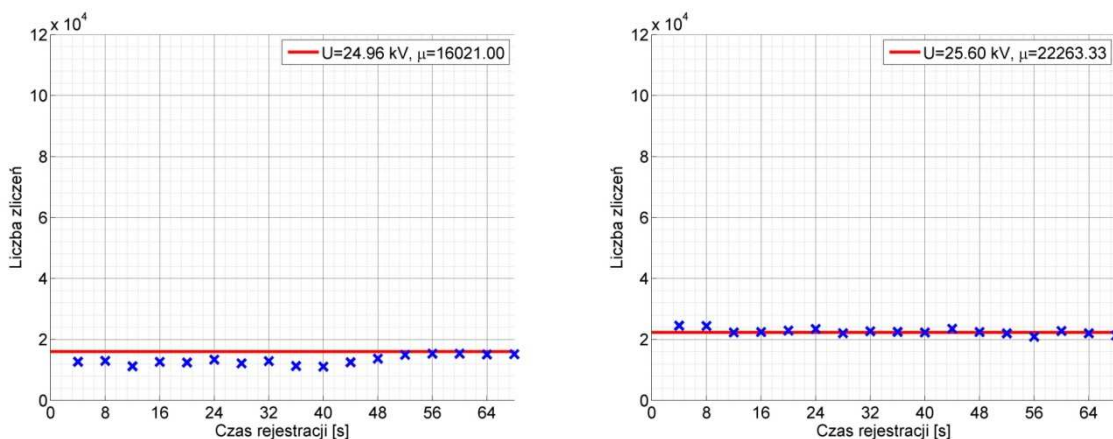
Rys. 5.24 Zależność liczby punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem, od wartości napięcia generacji WNZ, wszystkie zarejestrowane wartości.

5.2.2. Odległość między elektrodami 5 cm

Na rys. 5.25-5.26 przedstawiono zarejestrowane wartości zmiennej *liczba zliczeń* która koresponduje z liczbą punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji WNZ. Niebieskim krzyżykiem zaznaczono wartości uzyskane w trakcie pomiarów, a czerwoną linią - wartość średniej arytmetycznej.

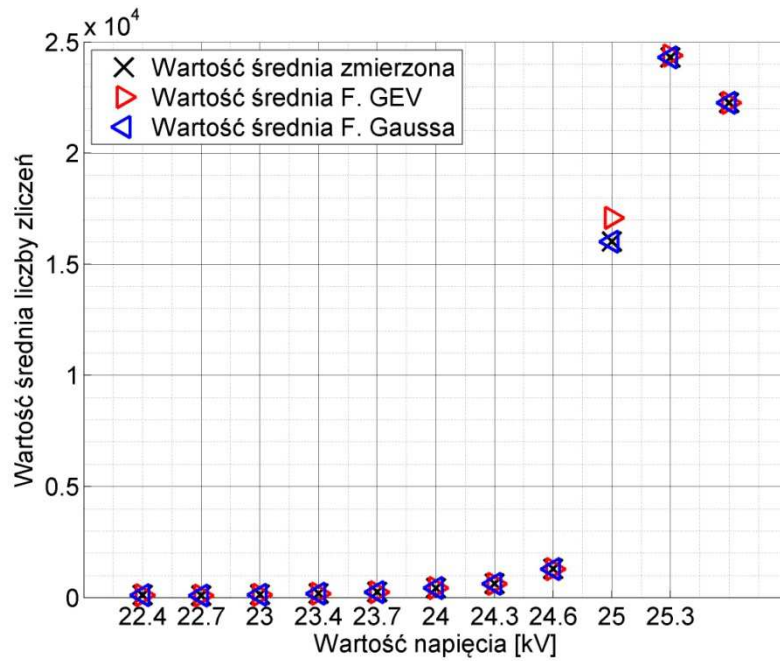


Rys. 5.25 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, przy napięciu $0,75 U_p = 24,00$ kV (po lewej), $0,77 U_p = 24,64$ kV (po prawej).



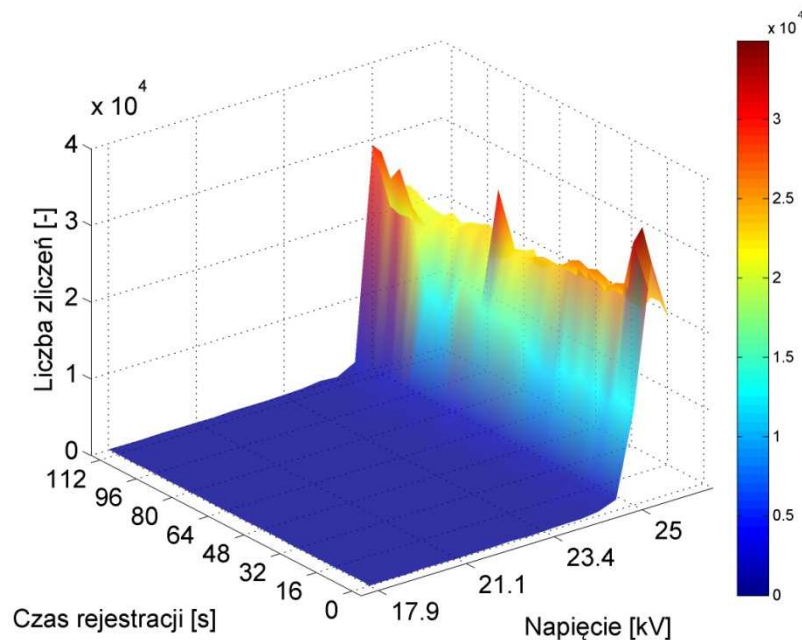
Rys. 5.26 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, przy napięciu $0,78 U_p = 24,96$ kV (po lewej), $0,80 U_p = 25,60$ kV (po prawej).

Na rys. 5.27 przedstawiono w funkcji napięcia generacji WNZ wartości średnich arytmetycznych, obliczonych ze wzoru (4.1), dla zarejestrowanych w pomiarach i dla obliczonych na podstawie estymat funkcji GEV i Gaussa wartości zmiennej *liczba zliczeń*. Czarnym krzyżykiem zaznaczono średnie obliczone z wartości pomiarowych, czerwonym trójkątem - średnie obliczone dla F. GEV, niebieskim trójkątem - średnie dla F. Gaussa.



Rys. 5.27 Zależność liczby punktów emisyjnych (wartości średnie) emitowanych przez WNZ generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcowym, od wartości napięcia generacji WNZ.

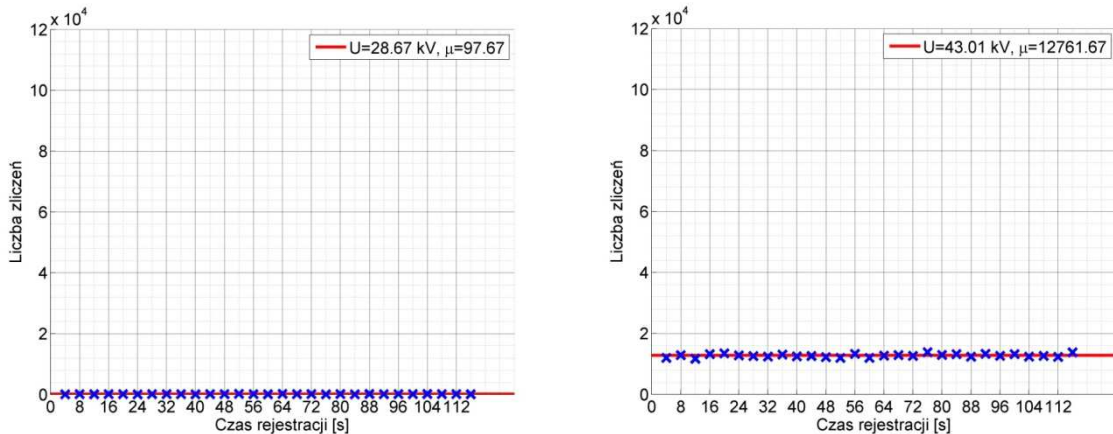
Na rys. 5.28 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości dotyczące liczby punktów emisyjnych generowanych przez WNZ występujące na powierzchni ceramicznego walca, przy odległości między elektrodami 5cm.



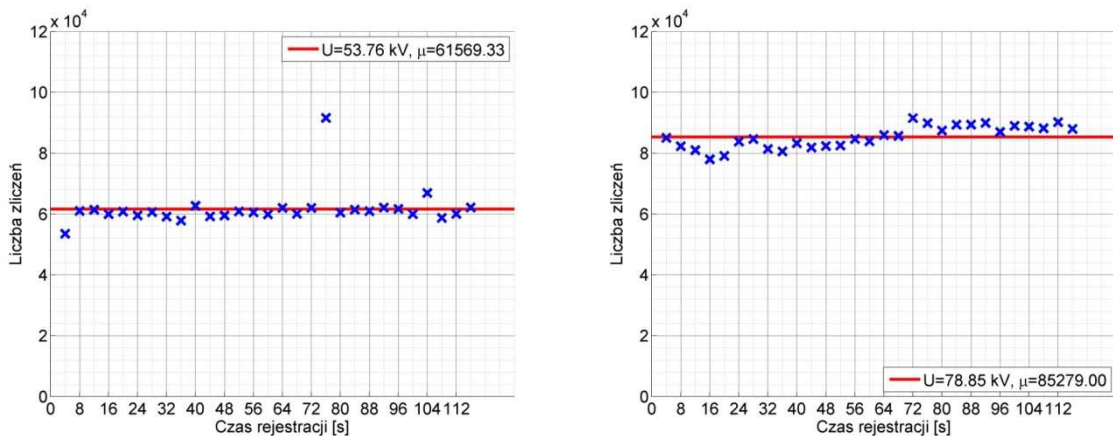
Rys. 5.28 Zależność liczby punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane w ceramicznym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem, od wartości napięcia generacji WNZ, wszystkie zarejestrowane wartości.

5.3. Natężenie emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego izolatora kołpakowego typu LK

Na rys. 5.29-5.30 przedstawiono zarejestrowane wartości zmiennej *liczba zliczeń* która koresponduje z liczbą punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego, podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji WNZ. Niebieskim krzyżykiem zaznaczono wartości uzyskane w trakcie pomiarów, a czerwoną linią - wartość średniej arytmetycznej.

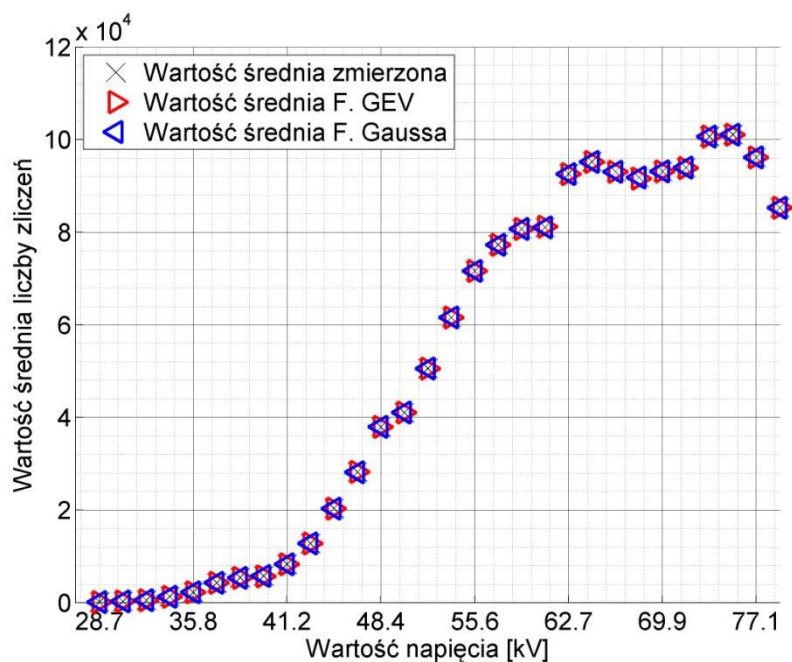


Rys. 5.29 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego przy napięciu $0,32 U_p= 28,67$ kV (po lewej), $0,48 U_p= 43,01$ kV (po prawej).



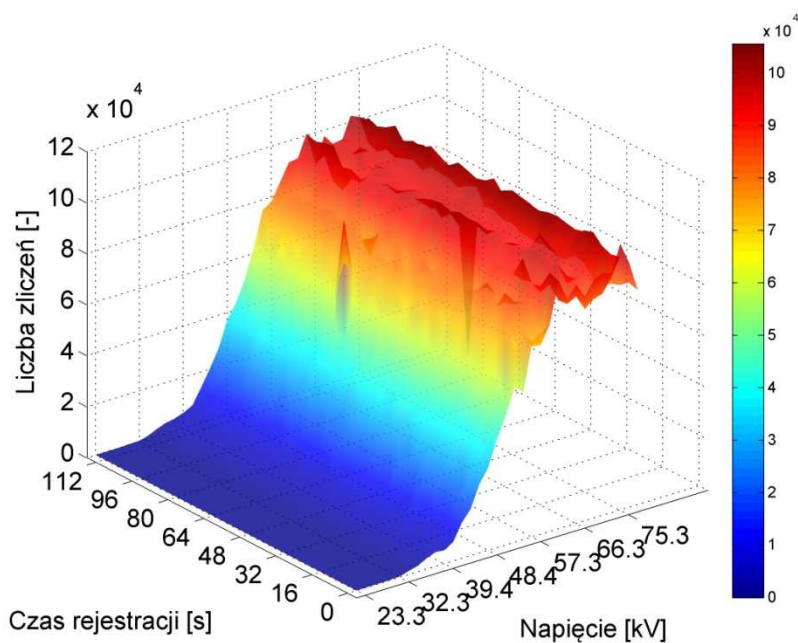
Rys. 5.30 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego przy napięciu $0,60 U_p= 53,76$ kV (po lewej), $0,88 U_p= 78,85$ kV (po prawej).

Na rys. 5.31 przedstawiono w funkcji napięcia generacji WNZ wartości średnich arytmetycznych, obliczonych ze wzoru (4.1), dla zarejestrowanych w pomiarach i dla obliczonych na podstawie estymat funkcji GEV i Gaussa wartości zmiennej *liczba zliczeń*. Czarnym krzyżykiem zaznaczono średnie obliczone z wartości pomiarowych, czerwonym trójkątem - średnie obliczone dla F. GEV, niebieskim trójkątem - średnie dla F. Gaussa.



Rys. 5.31 Zależność liczby punktów emisyjnych (wartość średnia) emitowanych przez wyładowania na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego od wielkości podawanego napięcia.

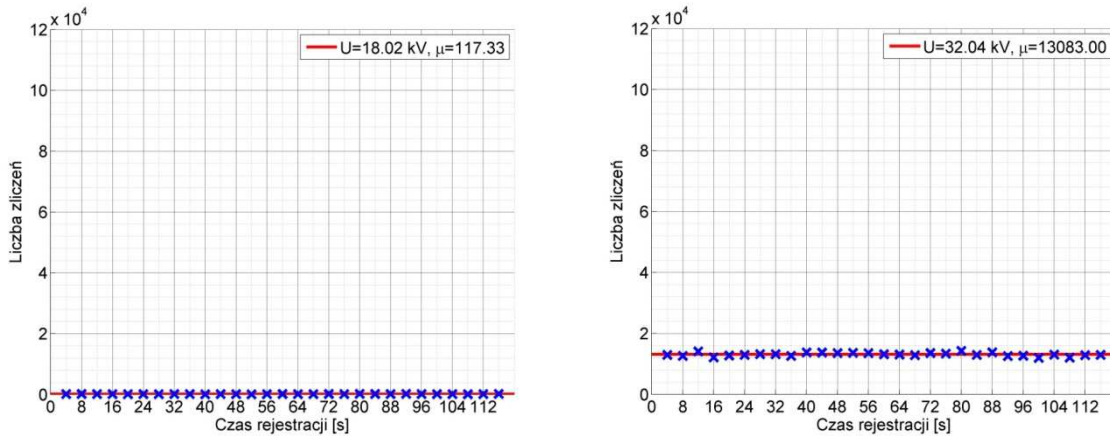
Na rys. 5.32 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości dotyczące liczby punktów emisyjnych generowanych przez WNZ występujące na powierzchni ceramicznego izolatora kołpakowego.



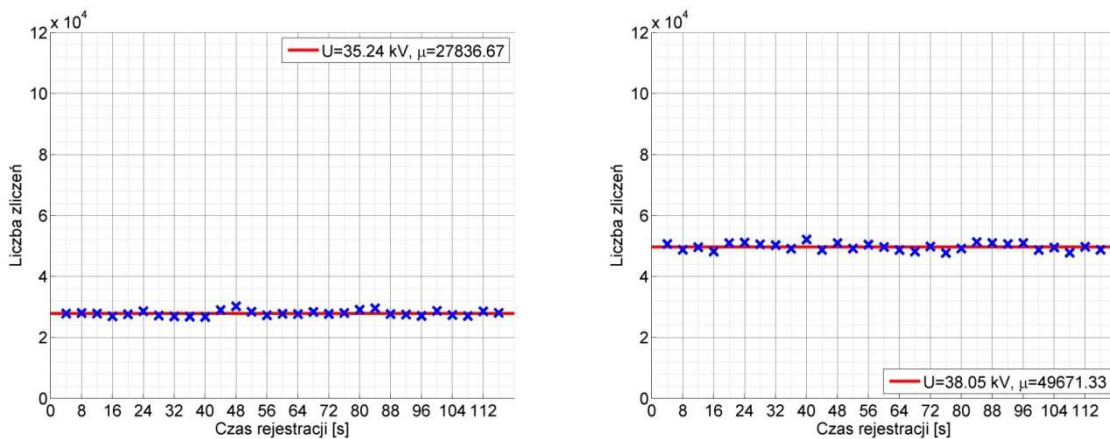
Rys. 5.32 Zależność liczby punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego od wielkości podawanego napięcia, wszystkie zarejestrowane wartości.

5.4. Natężenie emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego izolatora długopniowego typu LS

Na rys. 5.33-5.34 przedstawiono zarejestrowane wartości zmiennej *liczba zliczeń* która koresponduje z liczbą punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego, podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji WNZ. Niebieskim krzyżykiem zaznaczono wartości uzyskane w trakcie pomiarów, a czerwoną linią - wartość średniej arytmetycznej.

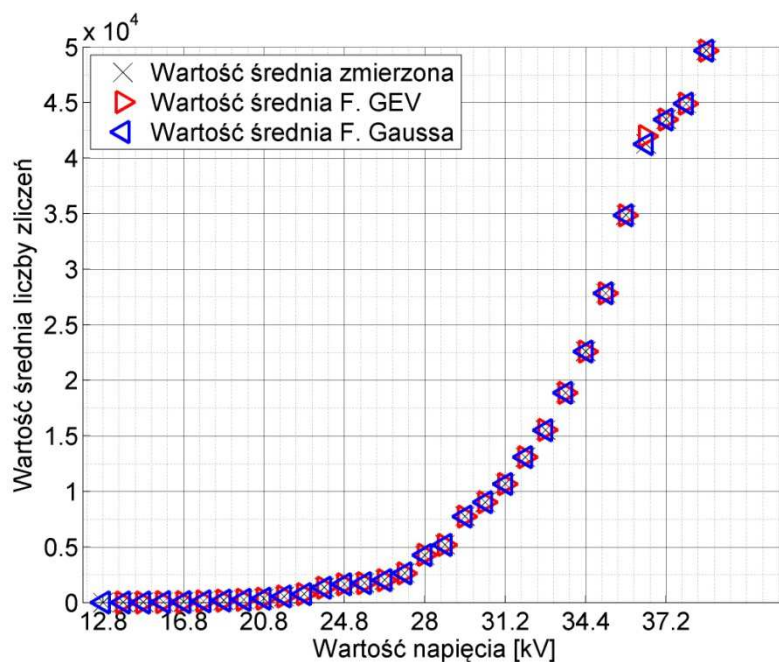


Rys. 5.33 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego przy napięciu $0,45 U_p= 18,02$ kV (po lewej), $0,80 U_p= 32,04$ kV (po prawej).



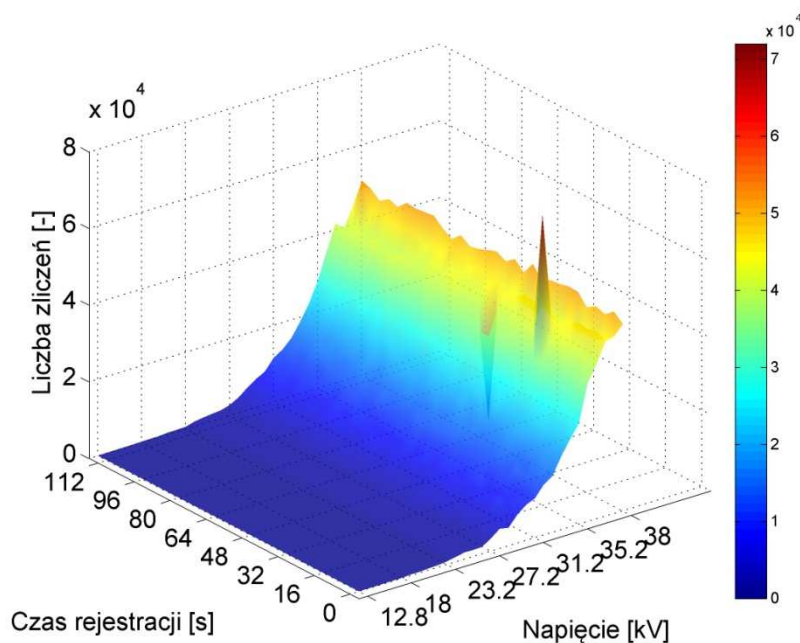
Rys. 5.34 Liczba punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego przy napięciu $0,88 U_p= 35,24$ kV (po lewej), $0,95 U_p= 38,05$ kV (po prawej).

Na rys. 5.35 przedstawiono w funkcji napięcia generacji WNZ wartości średnich arytmetycznych, obliczonych ze wzoru (4.1), dla zarejestrowanych w pomiarach i dla obliczonych na podstawie estymat funkcji GEV i Gaussa wartości zmiennej *liczba zliczeń*. Czarnym krzyżykiem zaznaczono średnie obliczone z wartości pomiarowych, czerwonym trójkątem - średnie obliczone dla F. GEV, niebieskim trójkątem - średnie dla F. Gaussa.



Rys. 5.35 Zależność liczby punktów emisyjnych (wartość średnia) emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego od wielkości podawanego napięcia.

Na rys. 5.36 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości dotyczące liczby punktów emisyjnych generowanych przez WNZ występujące na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego.



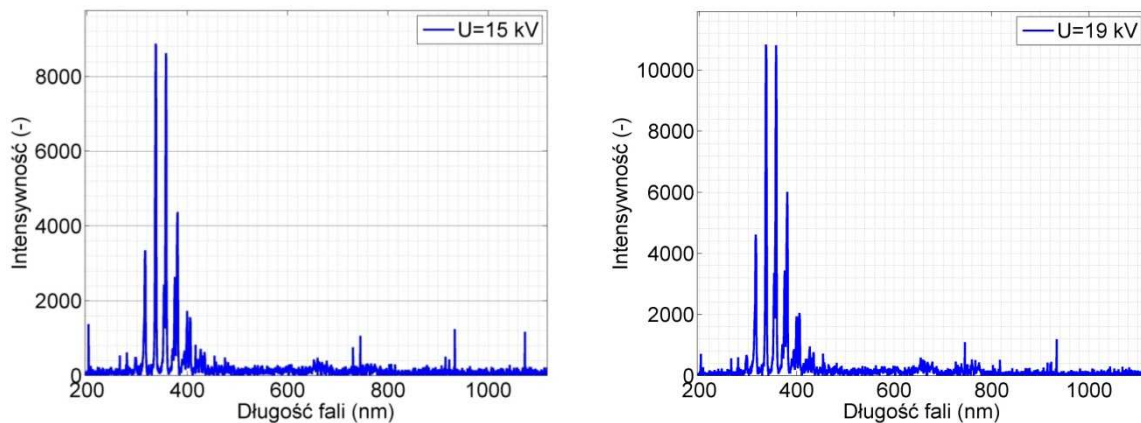
Rys. 5.36 Zależność liczby punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego od wielkości podawanego napięcia, wszystkie zarejestrowane wartości.

6. Wyniki pomiarów widm emisyjnych zarejestrowanych spektrofotometrem

6.1. Intensywność emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni walca izolacyjnego z porcelany wypełnionego kwarcem przy różnych napięciach i różnych odległościach między elektrodami

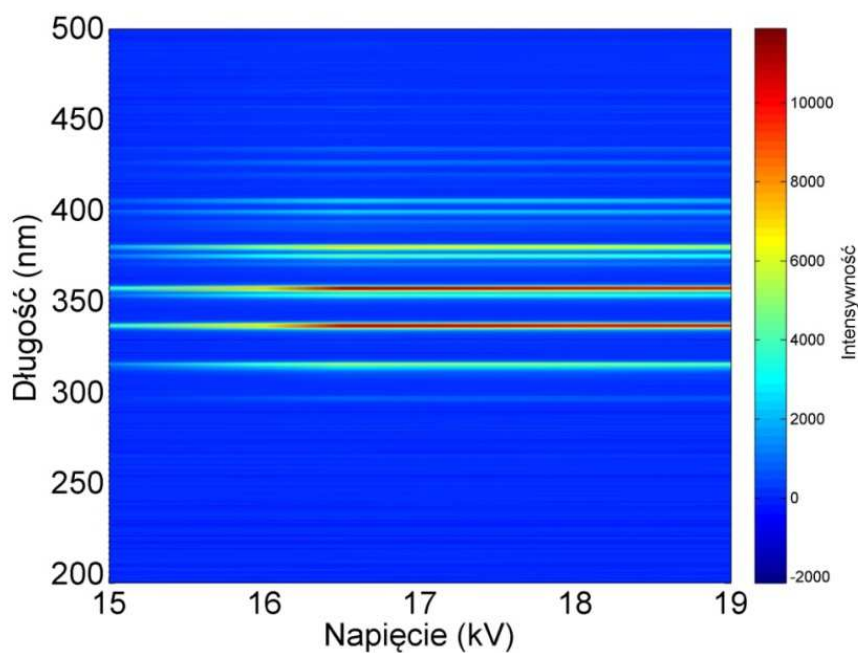
6.1.1. Odległość między elektrodami 3cm

Na rys. 6.1 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez WNZ generowane na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem podczas pomiarów przy odległości między elektrodami 3 cm, dla różnych wartości napięcia generacji WNZ.



Rys. 6.1 Intensywność widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem przy napięciu $0,75U_p = 15$ kV (po lewej) i $0,94U_p = 19$ kV (po prawej).

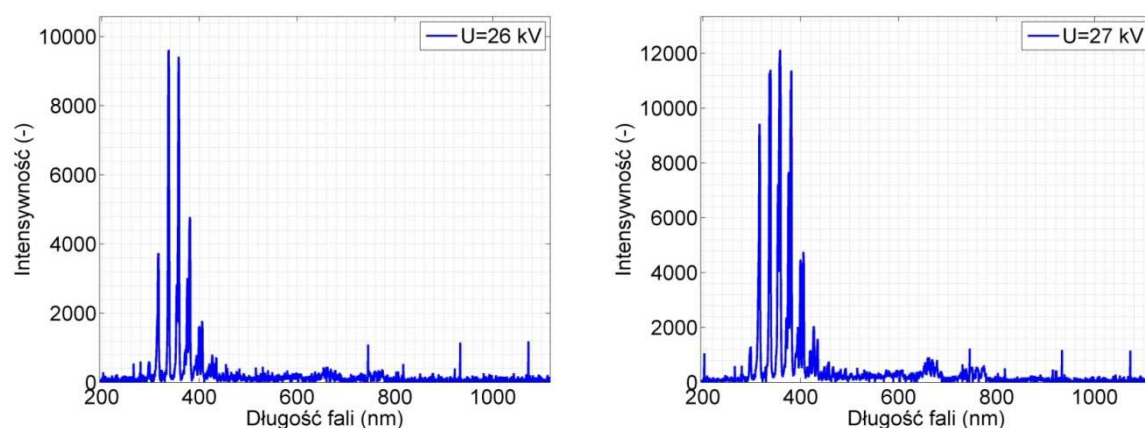
Na rys. 6.2, 6.4, 6.6, 6.8 i 6.10 przedstawiono uśrednione z pięciu pomiarów wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem w funkcji napięcia generacji WNZ, dla odległości między elektrodami odpowiednio: 3, 5, 7, 9 i 11 cm. Do uśredniania zastosowano średnią arytmetyczną (4.1).



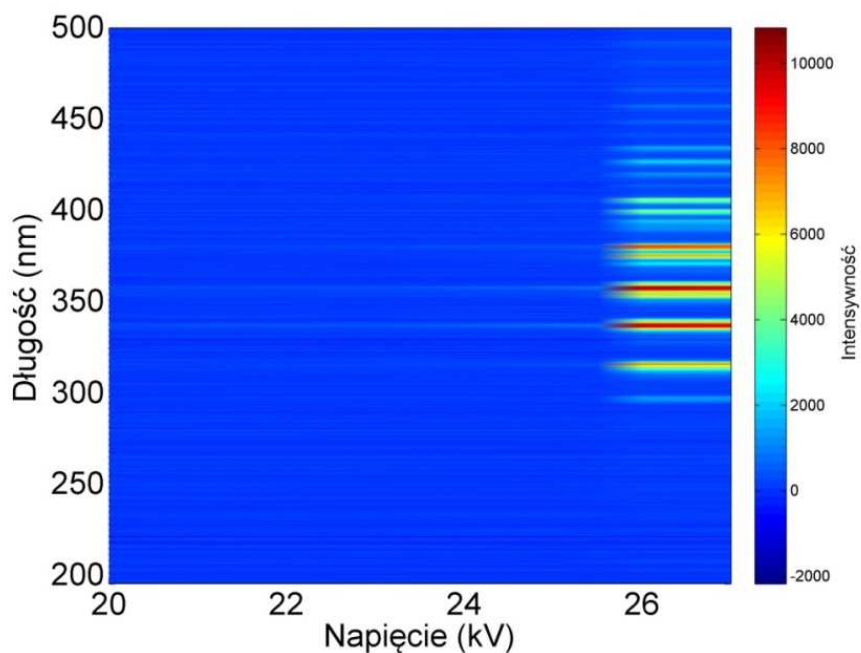
Rys. 6.2 Zależność intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem od napięcia generacji WNZ.

6.1.2. Odległość między elektrodami 5 cm

Na rys. 6.3 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez WNZ generowane na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem podczas pomiarów przy odległości 5 cm między elektrodami, dla różnych wartości napięcia generacji WNZ.



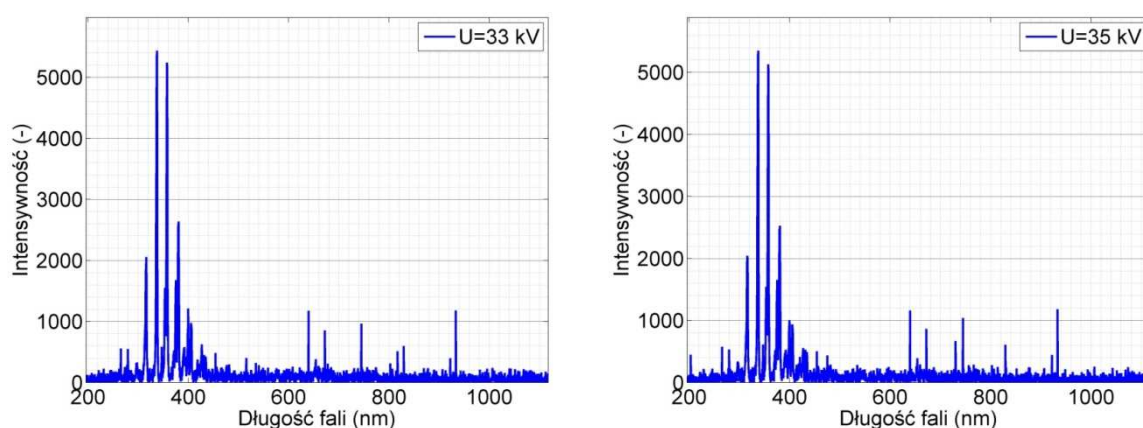
Rys. 6.3 Intensywność widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem przy napięciu $0,94U_p = 26$ kV (po lewej) i $0,95U_p = 27$ kV (po prawej).



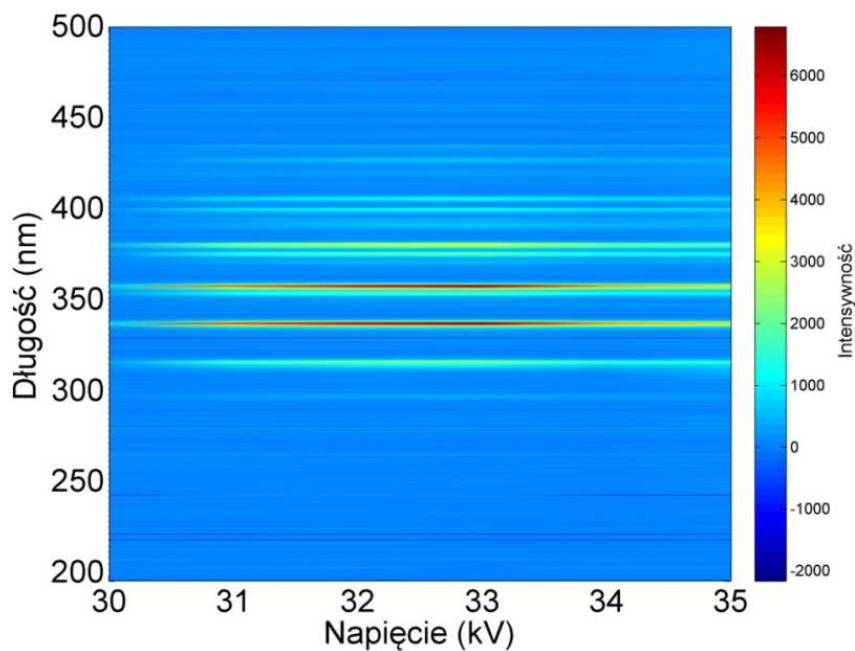
Rys. 6.4 Zależność intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem od napięcia generacji WNZ.

6.1.3. Odległość między elektrodami 7 cm

Na rys. 6.5 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez WNZ generowane na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem podczas pomiarów przy odległości 7 cm między elektrodami, dla różnych wartości napięcia generacji WNZ.



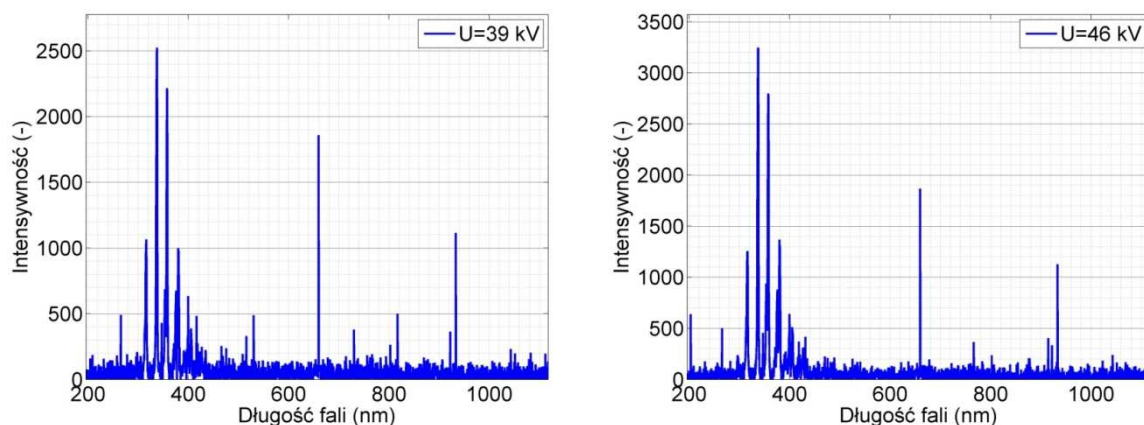
Rys. 6.5 Intensywność widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem przy napięciu $0,86U_p = 33$ kV (po lewej), $0,91U_p = 35$ kV (po prawej).



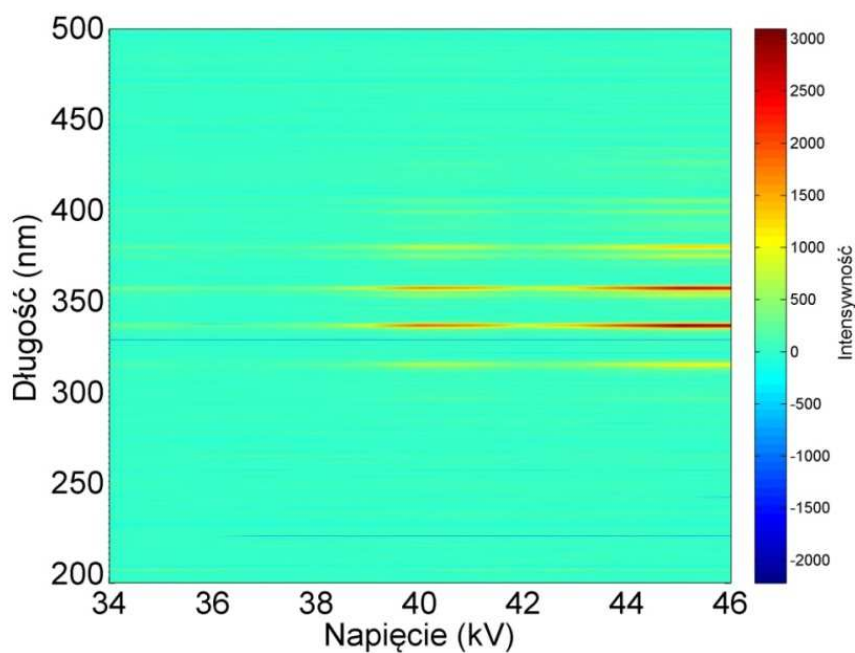
Rys. 6.6 Zależność intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem od napięcia generacji WNZ.

6.1.4. Odległość między elektrodami 9 cm

Na rys. 6.7 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez WNZ generowane na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem podczas pomiarów przy odległości 9 cm między elektrodami, dla różnych wartości napięcia generacji WNZ.



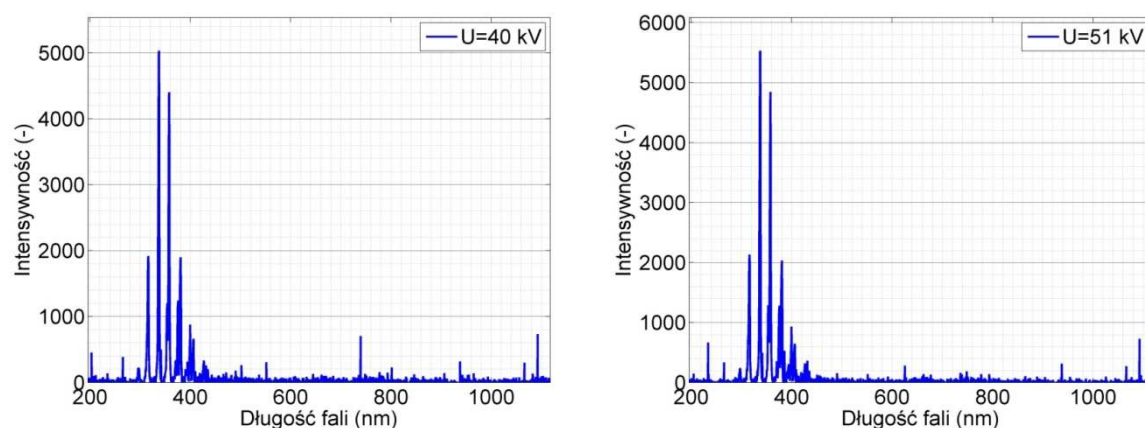
Rys. 6.7 Intensywność widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem przy napięciu $0,77U_p = 39$ kV (po lewej) i $0,91U_p = 46$ kV (po prawej).



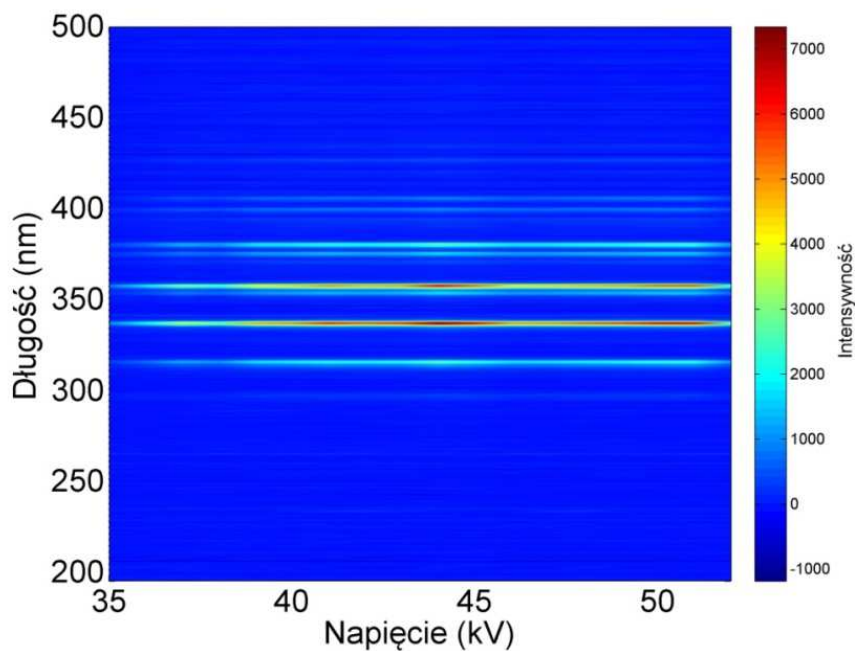
Rys. 6.8 Zależność intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem od napięcia generacji WNZ.

6.1.5. Odległość między elektrodami 11cm

Na rys. 6.9 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez WNZ generowane na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem podczas pomiarów przy odległości 11 cm między elektrodami, dla różnych wartości napięcia generacji WNZ.



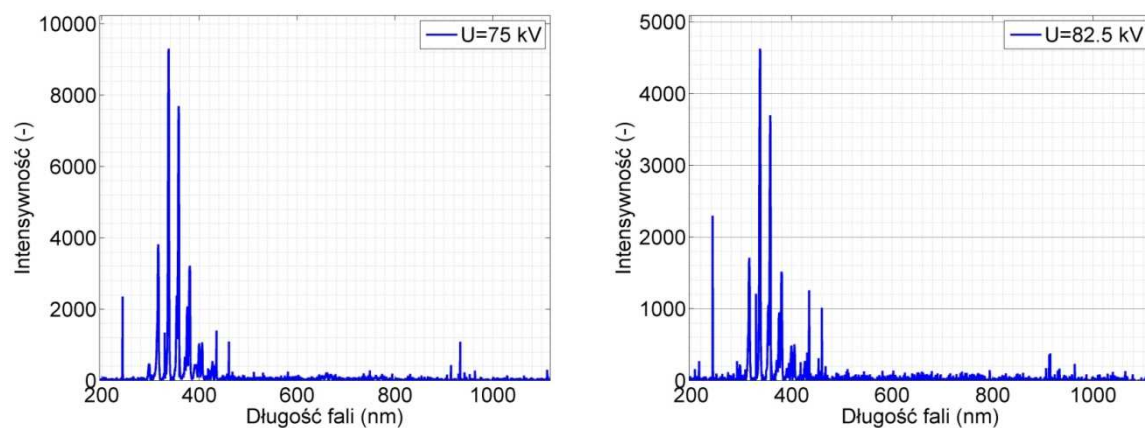
Rys. 6.9 Intensywność widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem przy napięciu $0,66U_p = 40$ kV (po lewej) i $0,84U_p = 51$ kV (po prawej).



Rys. 6.10 Zależność intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane w porcelanowym walcu izolacyjnym wypełnionym kwarcem od napięcia generacji WNZ.

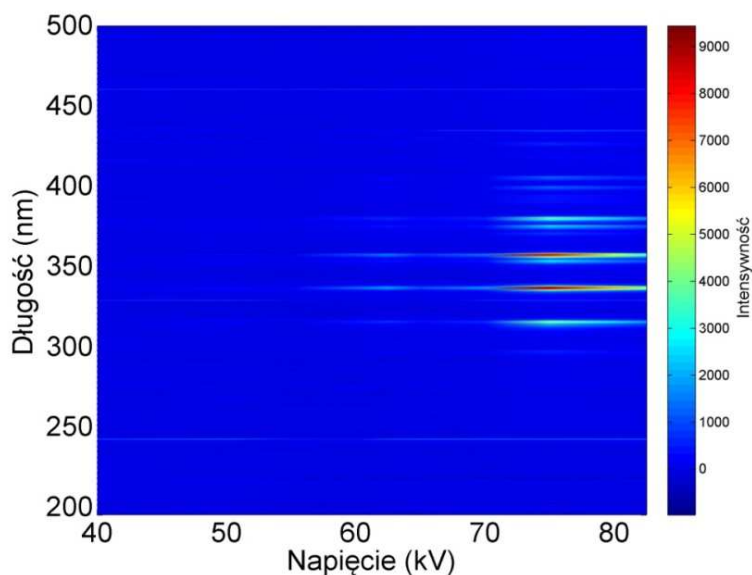
6.2. Intensywność emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni ceramicznego izolatora kołpakowego typu LK

Na rys. 6.11 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez WNZ generowane na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego dla różnych wartości napięcia generacji WNZ.



Rys. 6.11 Intensywność widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane na powierzchni izolatora kołpakowego wykonanego z porcelany przy napięciu $0,82U_p = 75$ kV (po lewej) i $0,90U_p = 82,5$ kV (po prawej).

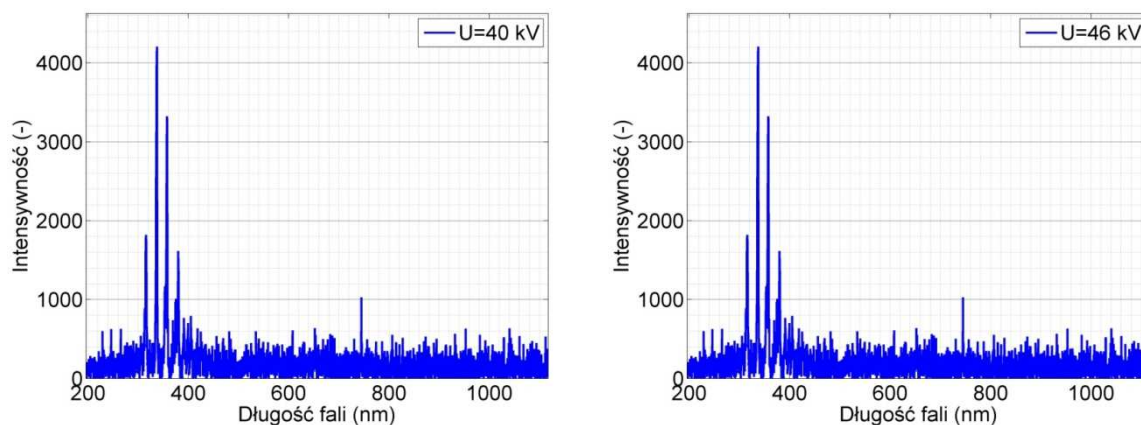
Na rys. 6.12 przedstawiono uśrednione z pięciu pomiarów wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane na powierzchni izolatora kołpakowego wykonanego z porcelany w funkcji napięcia generacji WNZ. Do uśredniania zastosowano średnią arytmetyczną (4.1).



Rys. 6.12 Zależność intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane na powierzchni izolatora kołpakowego wykonanego z porcelany od napięcia generacji WNZ.

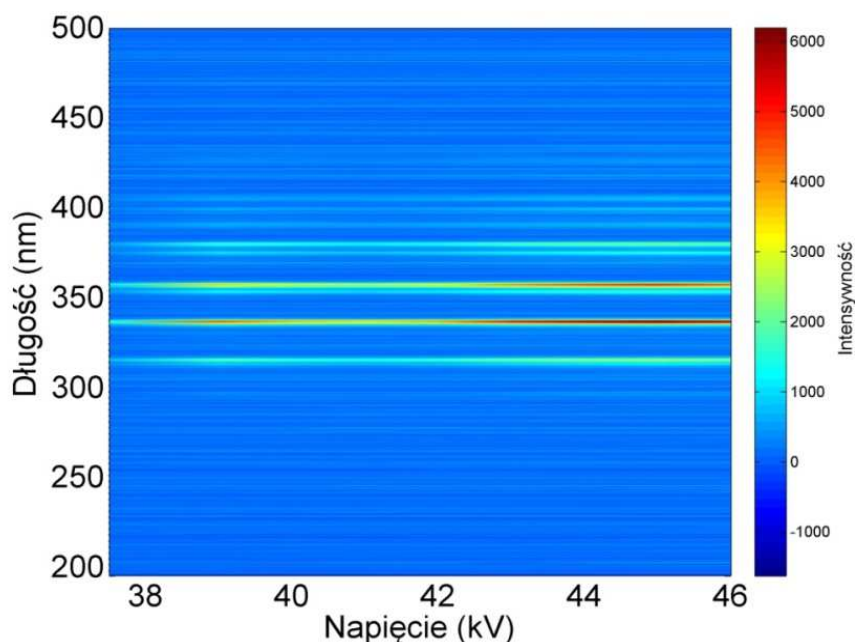
6.3. Intensywność emisji świetlnej emitowanej przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego typu LS

Na rys. 6.13 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez WNZ generowane na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego dla różnych wartości napięcia generacji WNZ.



Rys. 6.13 Intensywność widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane na powierzchni izolatora długopniowego przy napięciu $0,83U_p = 40$ kV (po lewej) i $0,95U_p = 46$ kV (po prawej).

Na rys. 6.14 przedstawiono uśrednione z pięciu pomiarów wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane na powierzchni izolatora długopniowego w funkcji napięcia generacji WNZ. Do uśredniania zastosowano średnią arytmetyczną (4.1).



Rys. 6.14 Zależność intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania generowane na powierzchni izolatora długopniowego od napięcia generacji WNZ.

Ze względu na ograniczoną objętość rozprawy, zaprezentowano tutaj tylko wybrane wyniki pomiarów i analiz. Wszystkie uzyskane wyniki w formie plików graficznych znajdują się w załączonej do rozprawy płycie DVD.

7. Numeryczne opracowanie wyników uzyskanych metodą UV, ich analiza i interpretacja

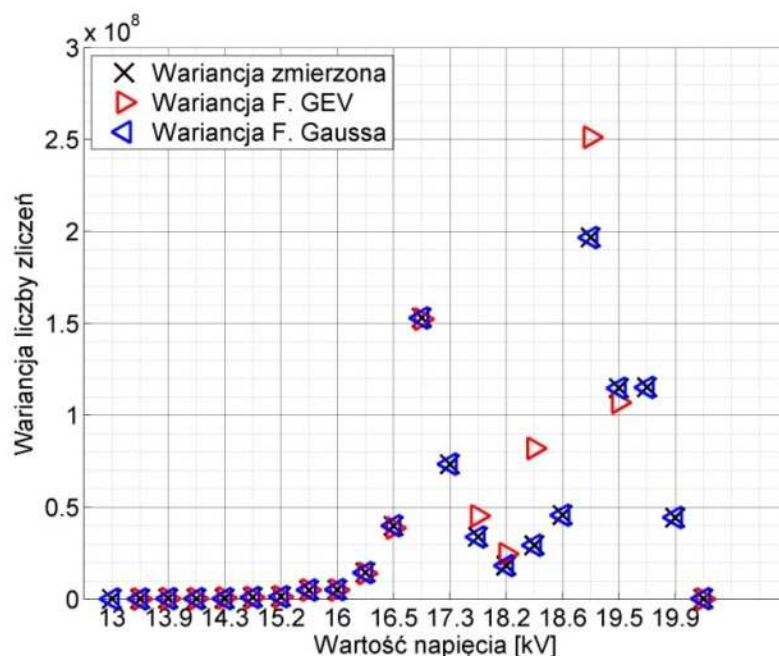
7.1. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni walców izolacyjnych wykonanych z porcelany z powietrzem w środku.

7.1.1. Odległość między elektrodami 3 cm

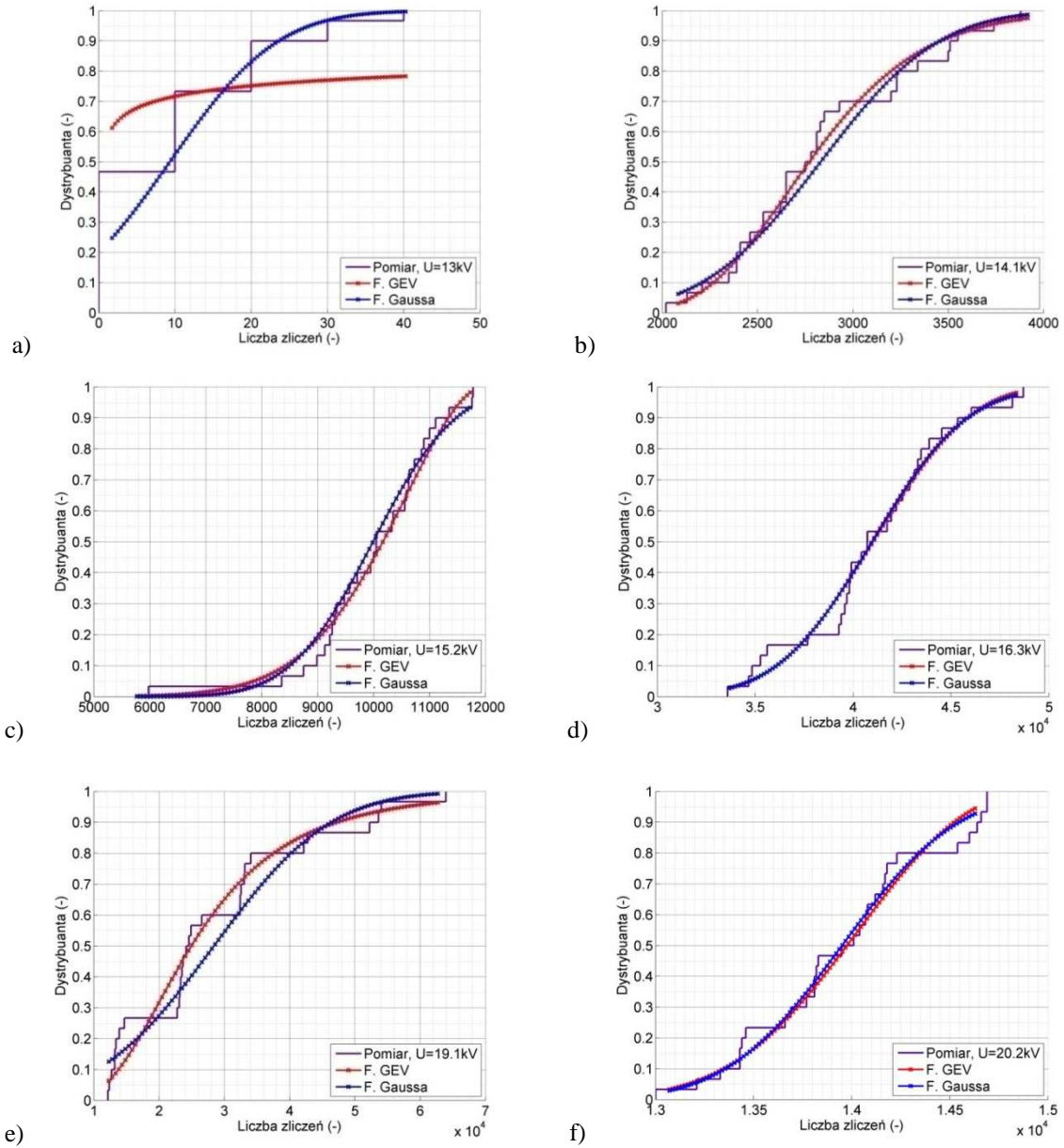
Na rys. 7.1 przedstawiono zależność liczby punktów emisyjnych (wariancja) emitowanych przez wyładowania generowane w walcu izolacyjnym ceramicznym wypełnionym powietrzem od wielkości podawanego napięcia. Krzyżykiem oznaczono wariancję zmiennej *liczba zliczeń* zarejestrowanych podczas pomiarów. Czerwonym trójkątem oznaczono wariancję uzyskaną z teoretycznego rozkładu obliczonego

z wykorzystaniem funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Zaobserwowano wzrost wariancji dla napięć przekraczających 0,74 w odniesieniu do napięcia przebicia U_p . Zaprezentowane wartości są w większości przypadków wielkości zmierzonych i obliczonych jednakowe. Wyjątek stanowią pojedyncze różnice dla funkcji GEV.

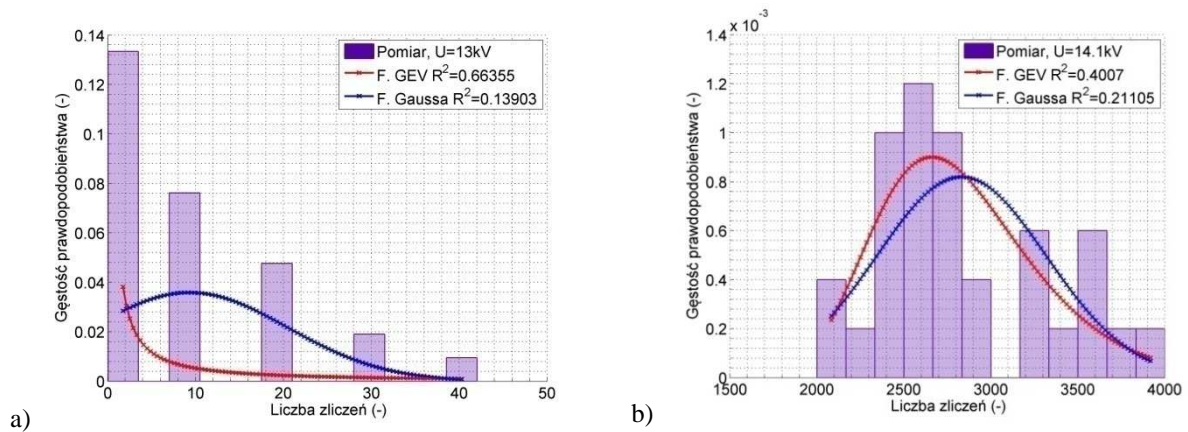
Na rys. 7.2 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,6 b) 0,65 c) 0,7 d) 0,75 e) 0,88 f) 0,93 [w odniesieniu do U_p]. Na rys. 7.3 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,6 b) 0,65 c) 0,7 d) 0,75 e) 0,88 f) 0,93 [w odniesieniu do U_p]. Kolorem fioletowym zaznaczono dane dotyczące wyników pomiarów, kolorem czerwonym dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Obliczenie histogramów i określenie teoretycznych rozkładów liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) oraz empirycznych dystrybuant umożliwiło potwierdzenie stochastycznej natury badanego zjawiska. Analiza dystrybuant pozwoliła na określenie najczęściej występujących wartości liczby zliczeń dla poszczególnych napięć generacji WNZ. Rozkłady liczebności pozwoliły na określenie liczby modów rozkładu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że rozkłady najbardziej zbliżone do rozkładu normalnego, tj. rozkłady Gaussa, występują dla napięcia generacji WNZ w zakresie 0,7-0,86 U_p , tj. 13-18 kV.

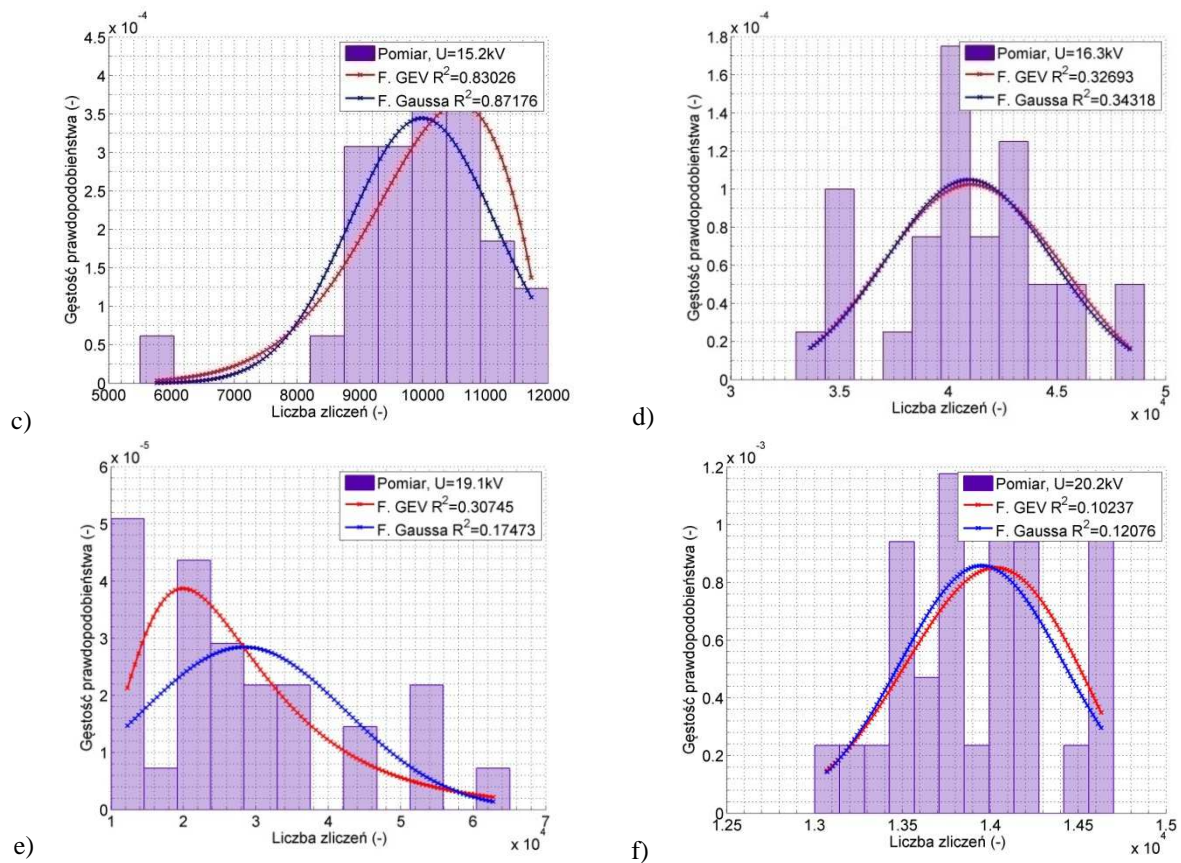


Rys. 7.1 Zależność wariancji zmiennej liczba zliczeń od wielkości podawanego napięcia.



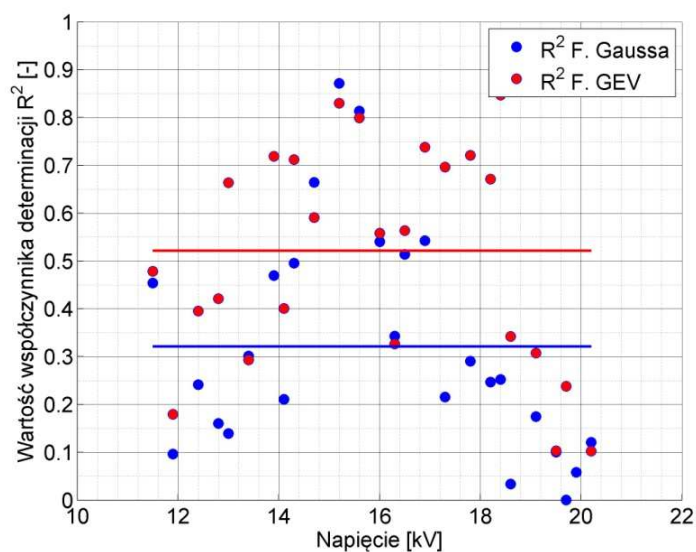
Rys. 7.2 Dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,6 U_p = 13 \text{ kV}$; b) $0,65 U_p = 14,1 \text{ kV}$; c) $0,7 U_p = 15,2 \text{ kV}$; d) $0,75 U_p = 16,3 \text{ kV}$; e) $0,88 U_p = 19,1 \text{ kV}$; f) $0,93 U_p = 20,02 \text{ kV}$.





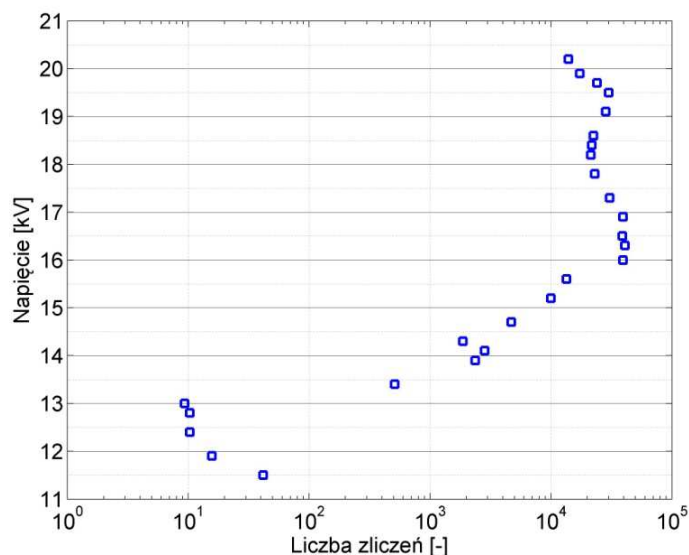
Rys. 7.3 Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,6 U_p = 13$ kV; b) $0,65 U_p = 14,1$ kV; c) $0,7 U_p = 15,2$ kV; d) $0,75 U_p = 16,3$ kV; e) $0,88 U_p = 19,1$ kV; f) $0,93 U_p = 20,02$ kV.

Na rys. 7.4 przedstawiono wartości współczynników determinacji R^2 obliczonego ze wzoru (4.5). Wartości obliczono dla wszystkich wyznaczonych rozkładów liczebności. Kolorem czerwonym zaznaczono dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - dla funkcji Gaussa. Dodatkowo linią ciągłą wskazano wartości średniej arytmetycznej. Przedstawione na rysunku 7.4 zestawienie umożliwiło podsumowanie wykonanej analizy stochastyczności, która wykazała, że charakter obserwowanej liczby punktów emisyjnych można częściej opisać rozkładem GEV. Niskie wartości współczynnika R^2 występują znacznie częściej dla rozkładu Gaussa co wskazuje, że natury badanego fenomenu nie powinno się wyjaśniać takim rozkładem.



Rys. 7.4 Zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji obliczonych dla obu rozpatrywanych teoretycznych rozkładów liczebności w funkcji napięcia generacji WNZ.

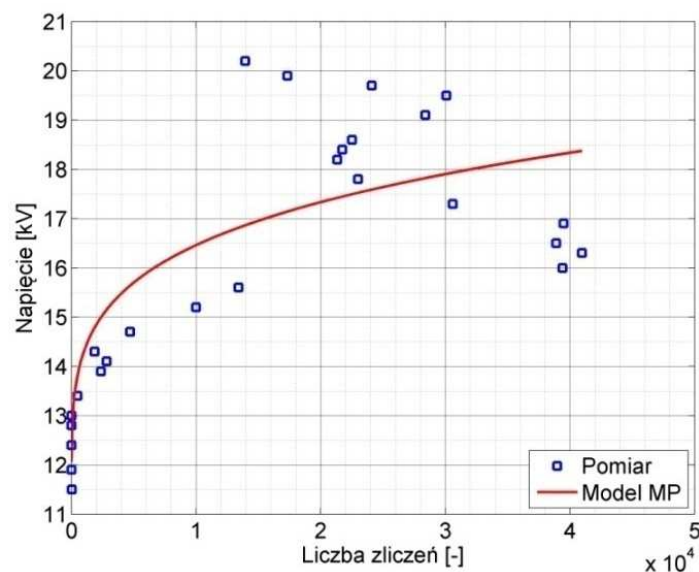
Na rys. 7.5 przedstawiono zależność wielkości napięcia podawanego na walec izolacyjny ceramiczny wypełniony powietrzem od uśrednionej liczby punktów emisyjnych emitowanych przez generowane wyładowania. Oś odciętych przedstawiono w skali logarytmicznej.



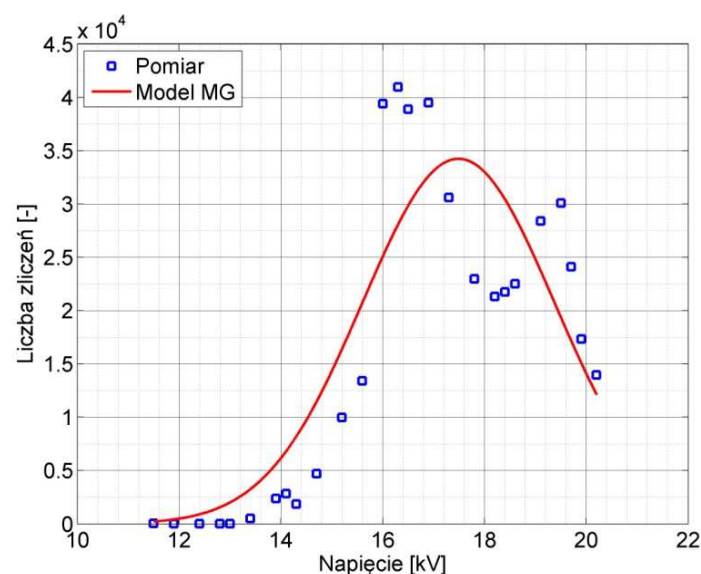
Rys. 7.5 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, wykres logarytmiczny.

Na rys. 7.6 kolorem niebieskim przedstawiono zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MP. Na rys. 7.7 kolorem niebieskim przedstawiono zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ, a kolorem czerwonym wynik

aproxymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MG. W tabelicy 7.1 zestawiono wartości parametrów dopasowania, obliczonych wg wzorów (4.10-13) dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. W tabelicy 7.2 zestawiono wartości estymowanych parametrów dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników *R-square* i *adj-R-square* stwierdzono nieznacznie lepsze dopasowanie modelu MG względem modelu MP. Natomiast wartości *RMSE* i *SSE*, które są znacząco bardziej zbliżone do zera dla modelu MP wskazują na możliwość zastosowania modelu MP do predykcji liczby punktów emisyjnych w zależności od napięcia generacji WNZ. Ze względu na wysokie wartości parametrów *RMSE* i *SSE* dla modelu MG nie należy zalecać jego stosowania do predykcji.



Rys. 7.6 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń* oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MP.



Rys. 7.7 Zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MG.

Tablica 7.1

Obliczone wartości parametrów dopasowania modeli regresyjnych.

Zestawienie parametrów określających jakość dopasowania modeli do danych empirycznych					
Nazwa	SSE	R-square	df	adj-R-square	RMSE
Wartość MG	1269039002	0,759	23	0,738	7428
Wartość MP	54,82	0,697	23	0,671	1,54

Tablica 7.2

Estymowane wartości parametrów modeli regresyjnych.

Estymowane wartości parametrów modeli			
Nazwa	A	B	C
Wartość MG	34237	17,48	2,66
Wartość MP	0,905	0,202	10,64

7.1.2. Odległość między elektrodami 5 cm, 7 cm, 9 cm i 11 cm

Sposób analizy i interpretacji widm emisyjnych zarejestrowanych w tym układzie, przy odległościach 5 cm, 7 cm, 9 cm i 11 cm między elektrodami jest taki sam pod względem metodologicznym i jakościowym jak przedstawiony w podrozdziale 7.1.1, zawierający wyniki w odniesieniu do analiz i interpretacji widm emisyjnych uzyskanych przy odległości między elektrodami 3 cm.

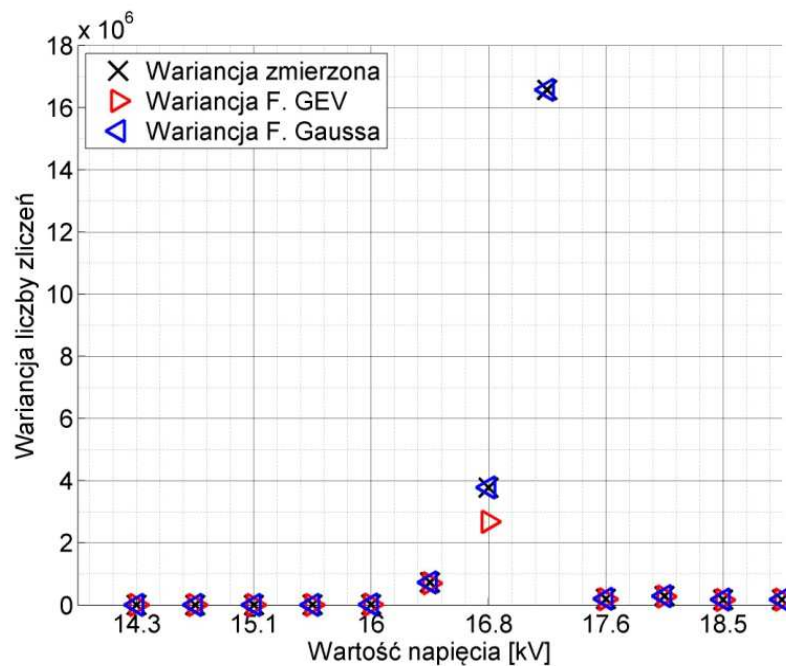
Uwzględniając powyższe, wyniki analiz i interpretacji widm emisyjnych zarejestrowanych w tym układzie przy odległościach 5 cm, 7 cm, 9 cm i 11 cm przedstawiono w sposób zbiorczy w Załączniku nr 1 niniejszej rozprawy.

7.2. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni ceramicznego izolatora walcowego wypełnionego kwarcem

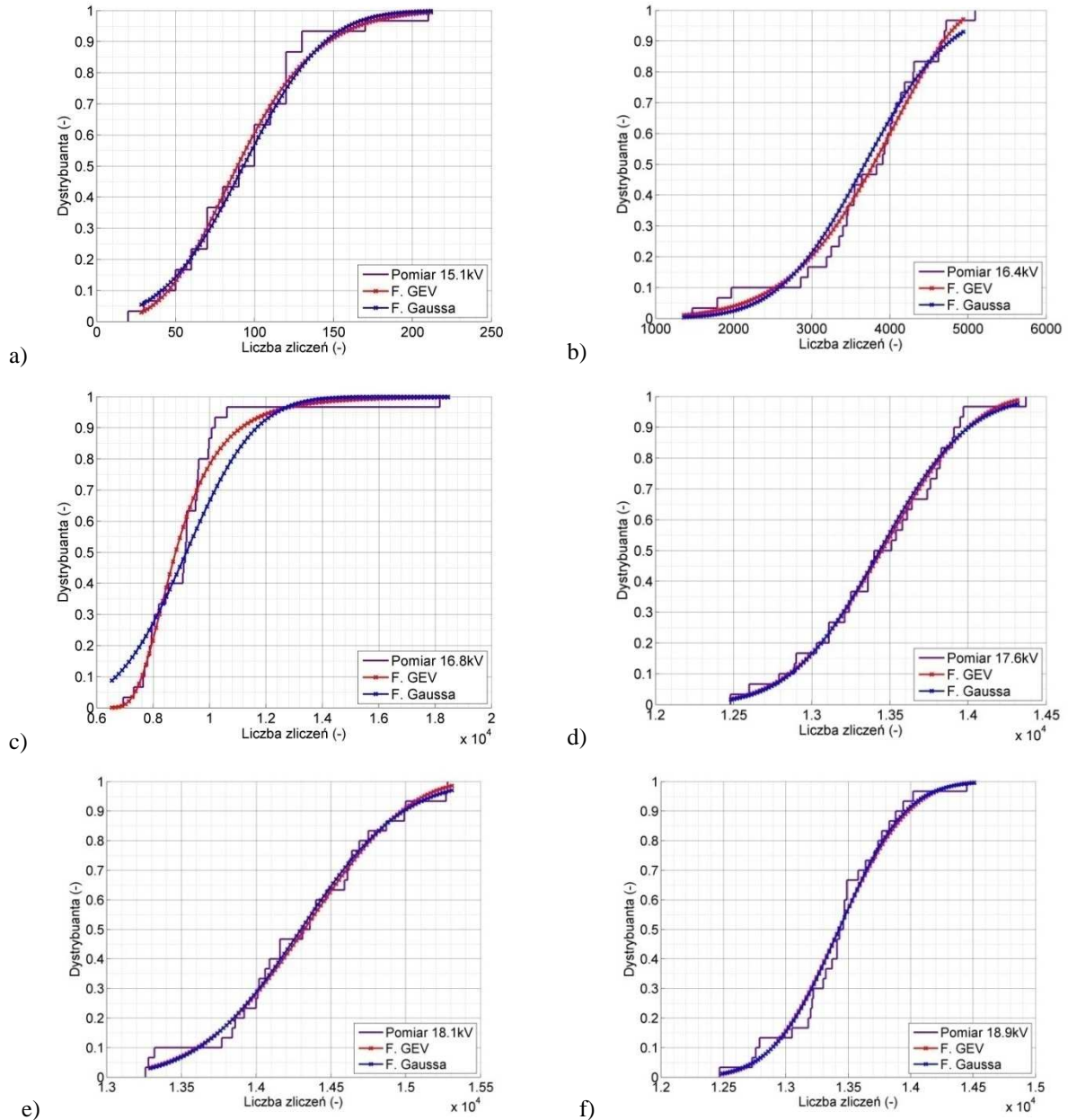
7.2.1. Odległości między elektrodami 3 cm

Na rys. 7.8 przedstawiono zależność liczby punktów emisyjnych (wariancja) emitowanych przez wyładowania generowane w walcu izolacyjnym ceramicznym wypełnionym kwarcem od wielkości podawanego napięcia. Krzyżykiem oznaczono wariancję zmiennej *liczba zliczeń* zarejestrowanych podczas pomiarów. Czerwonym trójkątem oznaczono wariancję uzyskaną z teoretycznego rozkładu obliczonego z wykorzystaniem funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Zaobserwowano wzrost wariancji dla napięć w zakresie 0,8-0,82 w odniesieniu do napięcia przebicia U_p . Zaprezentowane wartości są w większości przypadków wielkości zmierzonych i obliczonych jednakowe.

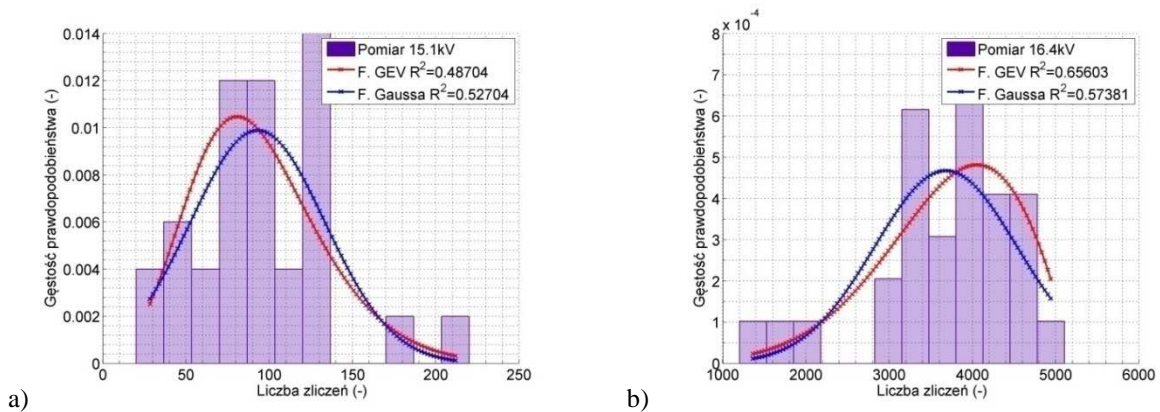
Na rys. 7.9 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,72 b) 0,78 c) 0,8 d) 0,84 e) 0,86 f) 0,9 [w odniesieniu do U_p]. Na rys. 7.10 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,72 b) 0,78 c) 0,8 d) 0,84 e) 0,86 f) 0,9 [w odniesieniu do U_p]. Kolorem fioletowym zaznaczono dane dotyczące wyników pomiarów, kolorem czerwonym dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Obliczenie histogramów i określenie teoretycznych rozkładów liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) oraz empirycznych dystrybuant umożliwiło potwierdzenie stochastycznej natury badanego zjawiska. Analiza dystrybuant pozwoliła na określenie najczęściej występujących wartości liczby zliczeń dla poszczególnych napięć generacji WNZ. Rozkłady liczebności pozwoliły na określenie liczby modów rozkładu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że rozkłady można opisywać oboma funkcjami gęstości prawdopodobieństwa dla napięć powyżej 15 kV, tj. 0,72 U_p .

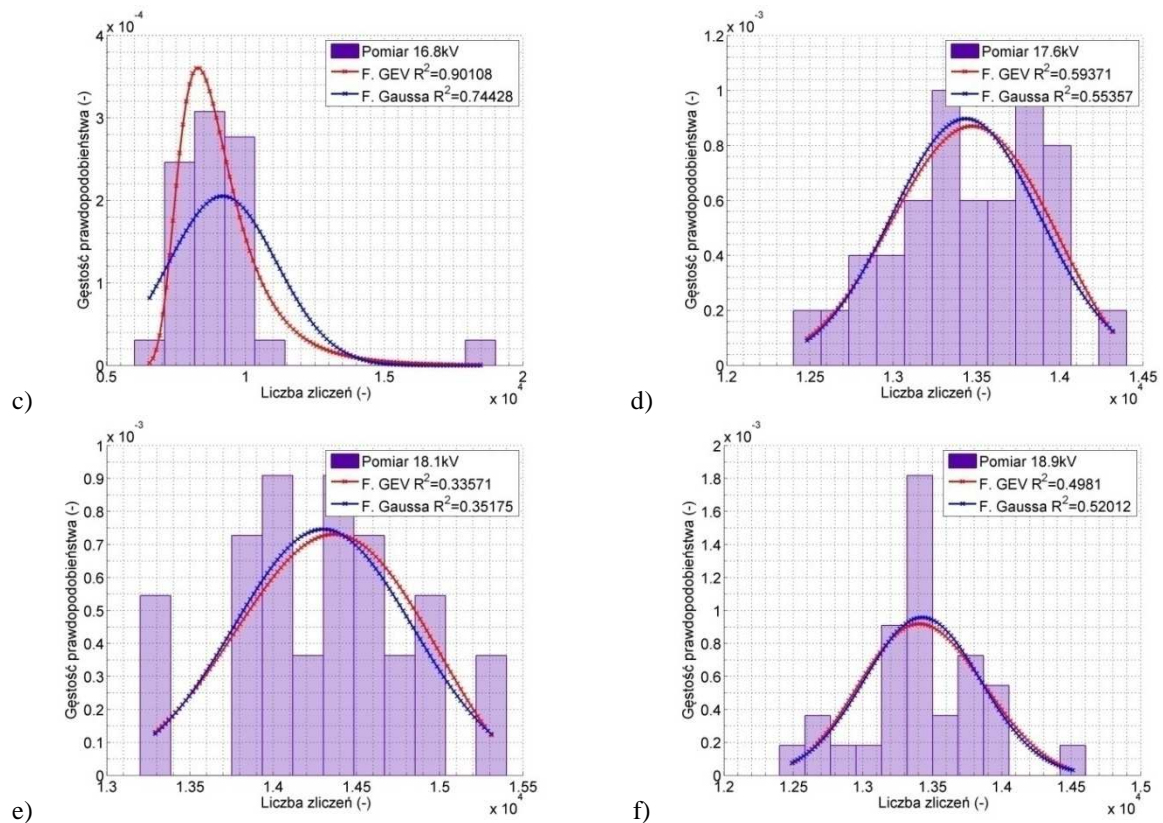


Rys. 7.8 Zależność wariancji zmiennej *liczba zliczeń* od wielkości podawanego napięcia.



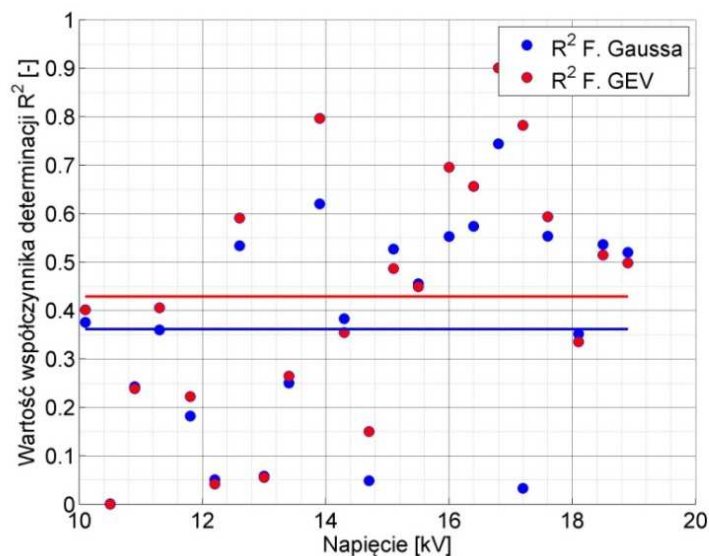
Rys. 7.9 Dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,72 U_p = 15,1$ kV; b) $0,78 U_p = 16,4$ kV; c) $0,8 U_p = 16,8$ kV; d) $0,84 U_p = 17,6$ kV; e) $0,86 U_p = 18,1$ kV; f) $0,9 U_p = 18,9$ kV.





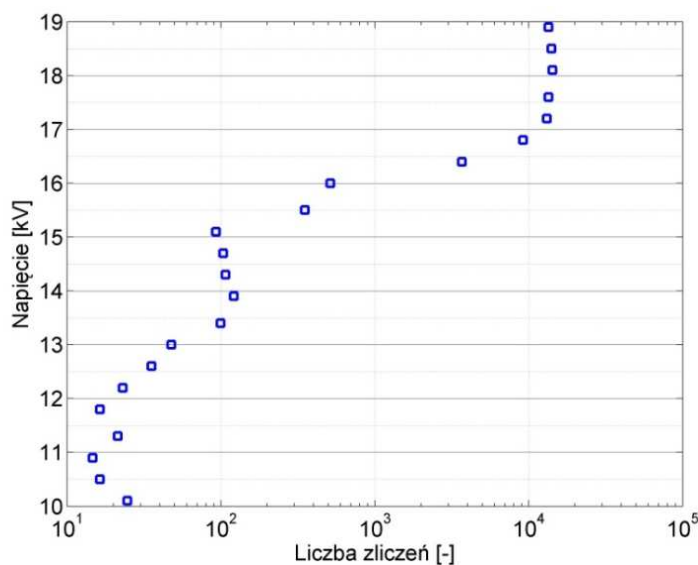
Rys. 7.10 Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,72 U_p = 15,1$ kV; b) $0,78 U_p = 16,4$ kV; c) $0,8 U_p = 16,8$ kV; d) $0,84 U_p = 17,6$ kV; e) $0,86 U_p = 18,1$ kV; f) $0,9 U_p = 18,9$ kV.

Na rys. 7.11 przedstawiono wartości współczynników determinacji R^2 obliczonego ze wzoru (4.5). Wartości obliczono dla wszystkich wyznaczonych rozkładów liczebności. Kolorem czerwonym zaznaczono dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - dla funkcji Gaussa. Dodatkowo linią ciągłą wskazano wartości średniej arytmetycznej. Przedstawione na rysunku 7.11 zestawienie umożliwiło podsumowanie wykonanej analizy stochastyczności, która wykazała, że charakter obserwowanej liczby punktów emisyjnych można częściej opisać rozkładem GEV. Niskie wartości współczynnika R^2 występują częściej dla rozkładu Gaussa.



Rys. 7.11 Zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji obliczonych dla obu rozpatrywanych teoretycznych rozkładów liczebności w funkcji napięcia generacji WNZ.

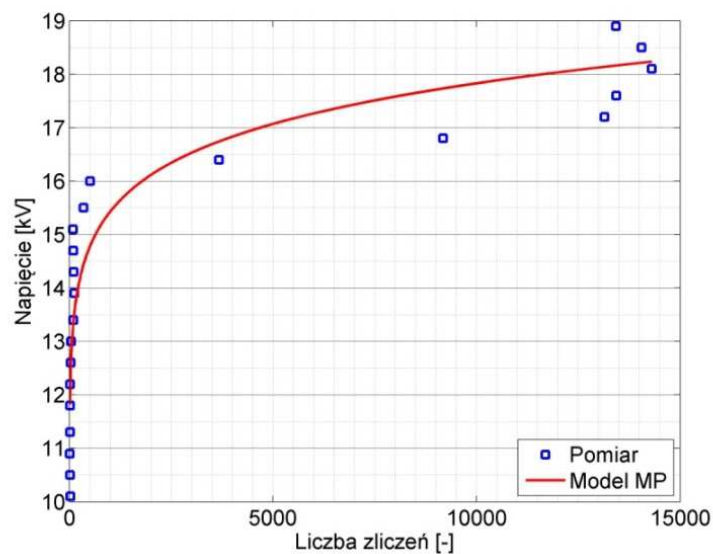
Na rys. 7.12 przedstawiono zależność wielkości napięcia podawanego na walec izolacyjny ceramiczny wypełniony kwarcem od uśrednionej liczby punktów emisyjnych emitowanych przez generowane wyładowania. Oś odciętych przedstawiono w skali logarytmicznej.



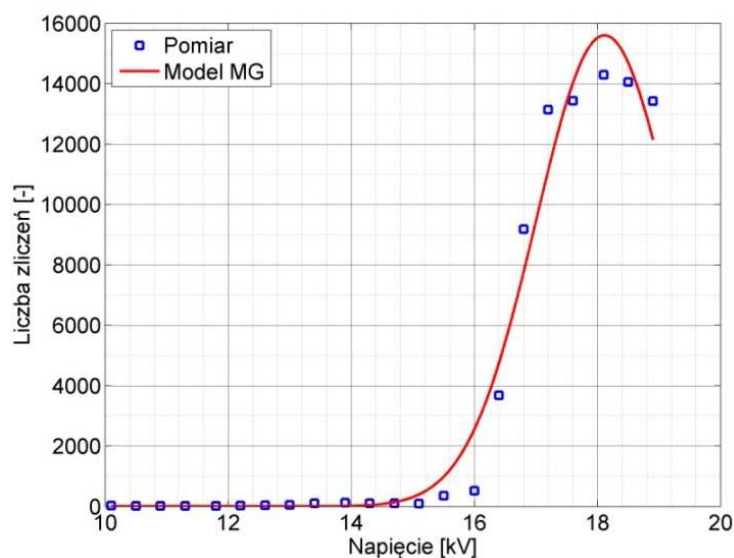
Rys. 7.12 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, wykres logarytmiczny.

Na rys. 7.13 kolorem niebieskim przedstawiono zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MP. Na rys. 7.14 kolorem niebieskim przedstawiono zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MG. W tabelicy 7.3 zestawiono wartości

parametrów dopasowania, obliczonych wg wzorów (4.10-13) dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. W tabelicy 7.4 zestawiono wartości estymowanych parametrów dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników *R-square* i *adj-R-square* stwierdzono nieznacznie lepsze dopasowanie modelu MG względem modelu MP. Natomiast wartości *RMSE* i *SSE*, które są znacząco bardziej zbliżone do zera dla modelu MP wskazują na możliwość zastosowania modelu MP do predykcji liczby punktów emisyjnych w zależności od napięcia generacji WNZ. Ze względu na wysokie wartości parametrów *RMSE* i *SSE* dla modelu MG nie zaleca się jego stosowania do predykcji.



Rys. 7.13 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń* oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MP.



Rys. 7.14 Zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MG.

Obliczone wartości parametrów dopasowania modeli regresyjnych

Zestawienie parametrów określających jakość dopasowania modeli do danych empirycznych					
Nazwa	SSE	R-square	dfe	adj-R-square	RMSE
Wartość MG	15993217	0,977	19	0,975	917
Wartość MP	19,496	0,875	20	0,869	0,987

Estymowane wartości parametrów modeli regresyjnych

Estymowane wartości parametrów modeli			
Nazwa	A	B	C
Wartość MG	15600	18,11	1,57
Wartość MP	9,988	0,0629	3,989e-08

7.2.2. Odległość między elektrodami 5 cm

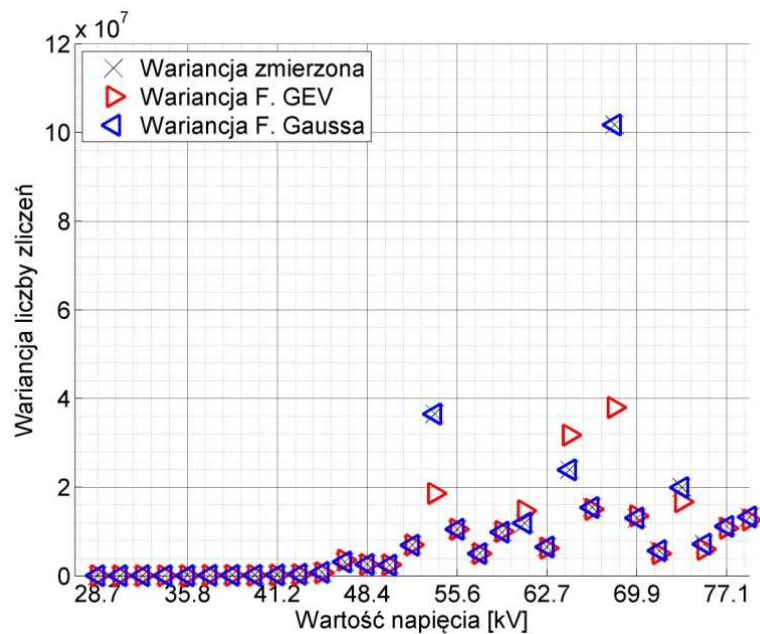
Sposób analizy i interpretacji widm emisyjnych generowanych przez wyładowania w na powierzchni ceramicznego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem przy odległości między elektrodami 5 cm, pod względem metodologicznym i jakościowym jest taki sam, jak przedstawiony w podrozdziale 7.2.1, zawierającym wyniki odnoszące się do odległości między elektrodami 3 cm. Z tego względu wyniki analiz i interpretacji widm emisyjnych zarejestrowanych w tym układzie przy odległości między elektrodami 5 cm, przedstawiono w Załączniku nr 2 do niniejszej rozprawy.

7.3. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego typu LK

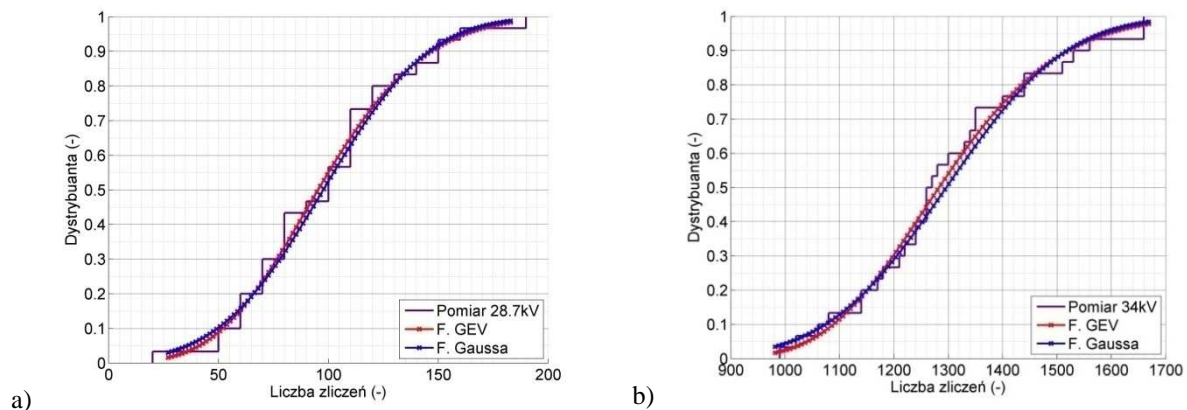
Na rys. 7.15 przedstawiono zależność liczby punktów emisyjnych (wariancja) emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego od wielkości podawanego napięcia. Krzyżykiem oznaczono wariację zmiennej *liczba zliczeń* zarejestrowanych podczas pomiarów. Czerwonym trójkątem oznaczono wariację uzyskaną z teoretycznego rozkładu obliczonego z wykorzystaniem funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Zaobserwowano wzrost wariacji dla napięć przekraczających 0,56 w odniesieniu do napięcia przebicia U_p . Zaprezentowane wartości są w większości przypadków wielkości zmierzonych i obliczonych jednakowe. Wyjątek stanowią pojedyncze różnice dla funkcji GEV.

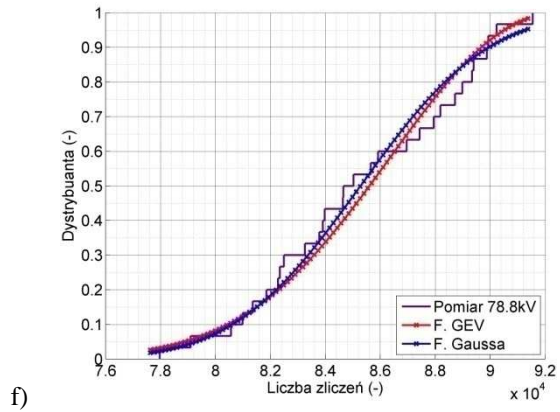
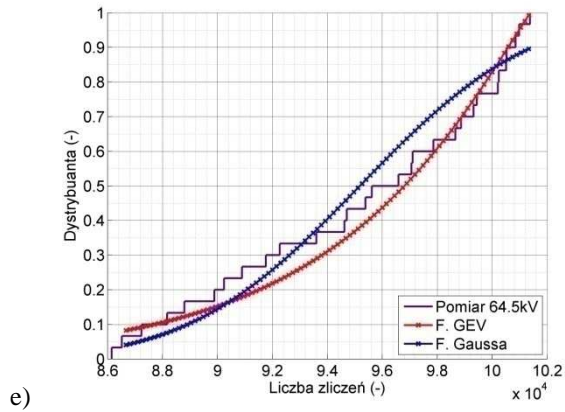
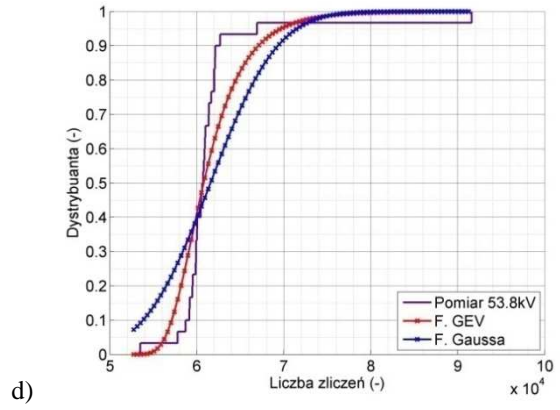
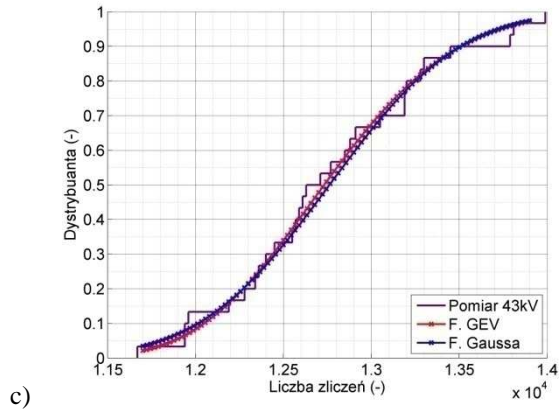
Na rys. 7.16 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,32 b) 0,38 c) 0,48

d) 0,6 e) 0,72 f) 0,88 [w odniesieniu do U_p]. Na rys. 7.17 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,32 b) 0,38 c) 0,48 d) 0,6 e) 0,72 f) 0,88 [w odniesieniu do U_p]. Kolorem fioletowym zaznaczono dane dotyczące wyników pomiarów, kolorem czerwonym dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Obliczenie histogramów i określenie teoretycznych rozkładów liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) oraz empirycznych dystrybuant umożliwiło potwierdzenie stochastycznej natury badanego zjawiska. Analiza dystrybuant pozwoliła na określenie najczęściej występujących wartości liczby zliczeń dla poszczególnych napięć generacji WNZ. Rozkłady liczebności pozwoliły na określenie liczby modów rozkładu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że poza pojedynczymi przypadkami wszystkie rozkłady można opisać zarówno modelem GEV jak i Gaussa.

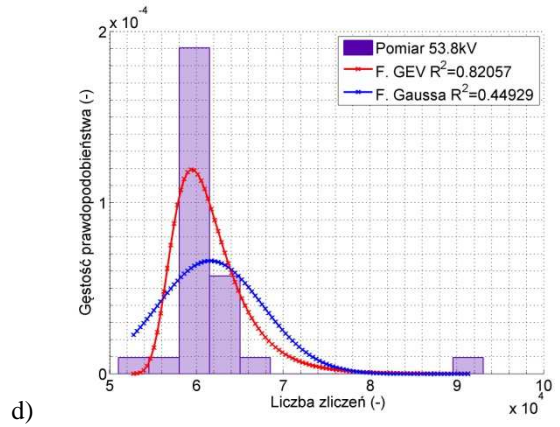
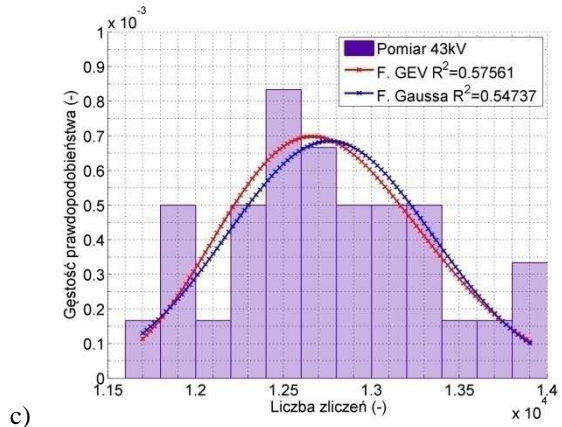
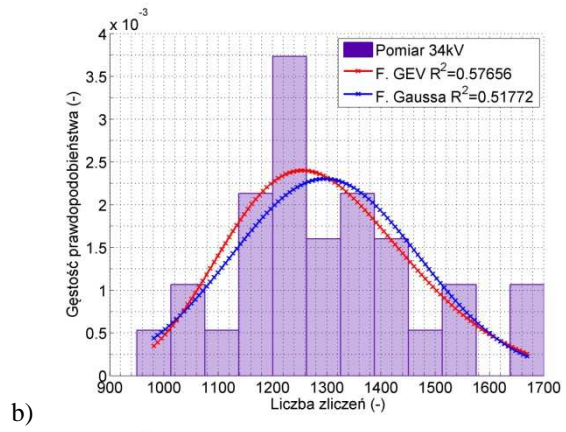
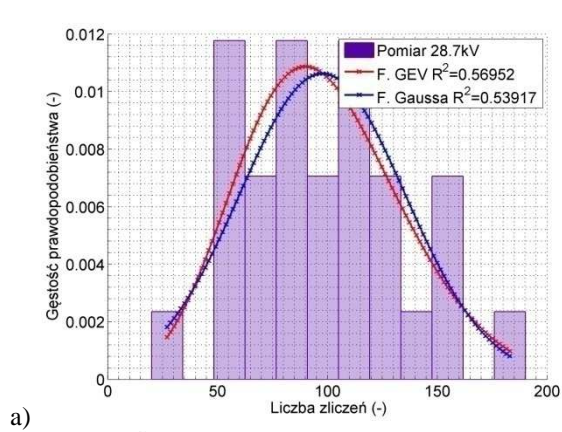


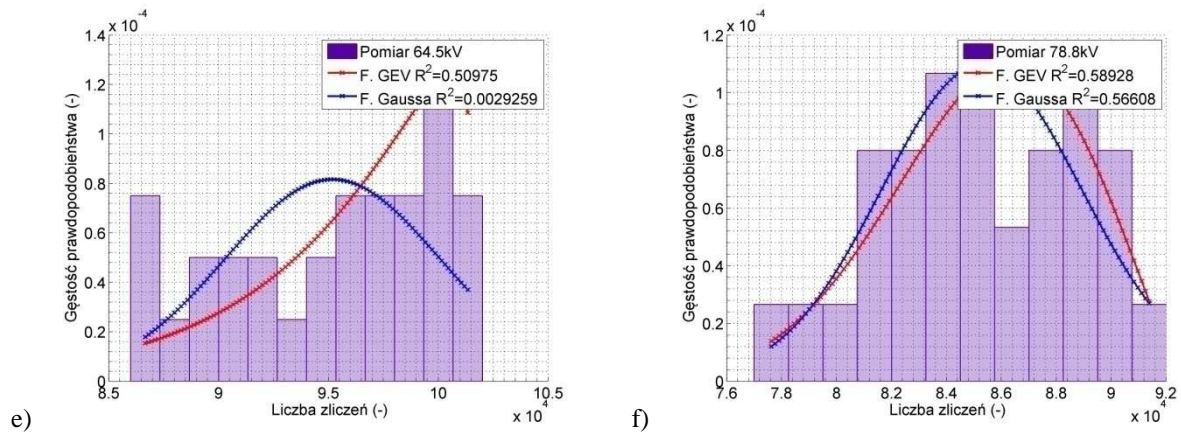
Rys. 7.15 Zależność wariancji zmiennej liczba zliczeń od wielkości podawanego napięcia.





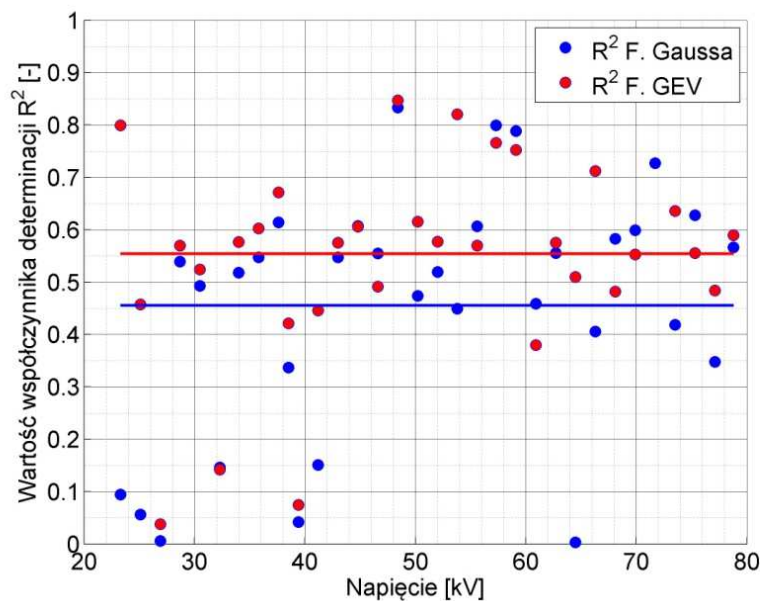
Rys. 7.16 Dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,32 U_p = 28,7 \text{ kV}$; b) $0,38 U_p = 34 \text{ kV}$; c) $0,48 U_p = 43 \text{ kV}$; d) $0,6 U_p = 53,8 \text{ kV}$; e) $0,72 U_p = 64,5 \text{ kV}$; f) $0,88 U_p = 78,8 \text{ kV}$.





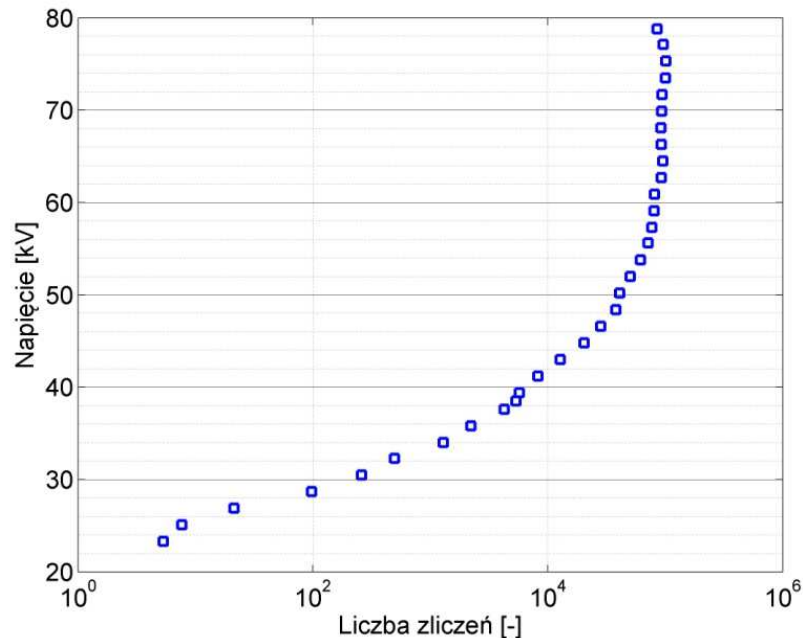
Rys. 7.17 Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,32 U_p = 28,7$ kV; b) $0,38 U_p = 34$ kV; c) $0,48 U_p = 43$ kV; d) $0,6 U_p = 53,8$ kV; e) $0,72 U_p = 64,5$ kV; f) $0,88 U_p = 78,8$ kV.

Na rys. 7.18 przedstawiono wartości współczynników determinacji R^2 obliczonego ze wzoru (4.5). Wartości obliczono dla wszystkich wyznaczonych rozkładów liczebności. Kolorem czerwonym zaznaczono dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - dla funkcji Gaussa. Dodatkowo linią ciągłą wskazano wartości średniej arytmetycznej. Przedstawione na rysunku 7.18 zestawienie umożliwiło podsumowanie wykonanej analizy stochastyczności, która wykazała, że charakter obserwowanej liczby punktów emisyjnych można poza pojedynczymi przypadkami opisać obydwoma rozpatrywanymi rozkładami.



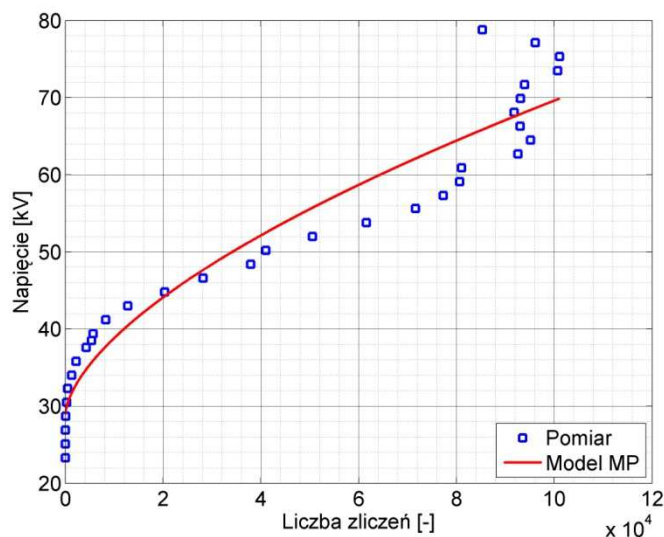
Rys. 7.18 Zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji obliczonych dla obu rozpatrywanych teoretycznych rozkładów liczebności w funkcji napięcia generacji WNZ

Na rys. 7.19 przedstawiono zależność wielkości napięcia podawanego na walec izolacyjny ceramiczny wypełniony kwarcem od uśrednionej liczby punktów emisyjnych emitowanych przez generowane wyładowania. Oś odciętych przedstawiono w skali logarytmicznej.

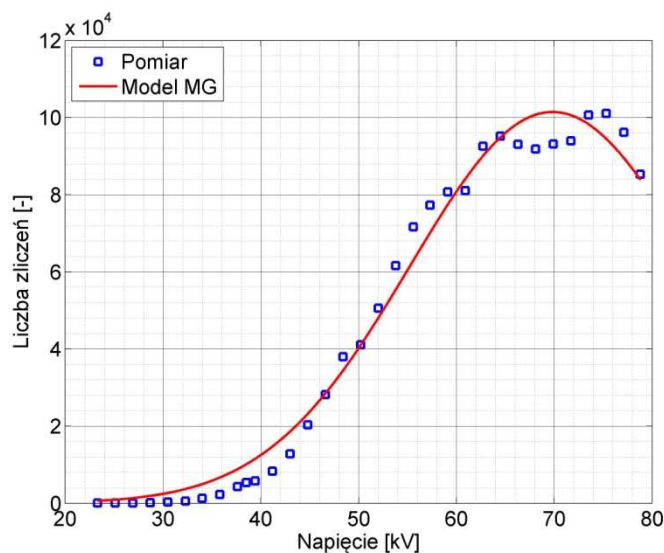


Rys. 7.19 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, wykres logarytmiczny.

Na rys. 7.20 kolorem niebieskim przedstawiono zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MP. Na rys. 7.21 kolorem niebieskim przedstawiono zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MG. W tabelicy 7.5 zestawiono wartości parametrów dopasowania, obliczonych wg wzorów (4.10-13) dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. W tabelicy 7.6 zestawiono wartości estymowanych parametrów dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników *R-square* i *adj-R-square* stwierdzono jednakowo doskonałe dopasowanie obu rozpatrywanych modeli. Natomiast wartości *RMSE* i *SSE*, które są znacząco bardziej zbliżone do zera dla modelu MP wskazują na możliwość zastosowania modelu MP do predykcji liczby punktów emisyjnych w zależności od napięcia generacji WNZ. Ze względu na wysokie wartości parametrów *RMSE* i *SSE* dla modelu MG nie należy zalecać jego stosowania do predykcji.



Rys. 7.20 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń* oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MP.



Rys. 7.21 Zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MG.

Tablica 7.5

Obliczone wartości parametrów dopasowania modeli regresyjnych.

Zestawienie parametrów określających jakość dopasowania modeli do danych empirycznych					
Nazwa	SSE	R-square	dfe	adj-R-square	RMSE
Wartość MG	742590918	0,985	30	0,985	4975
Wartość MP	645	0,927	30	0,922	4,63

Tablica 7.6

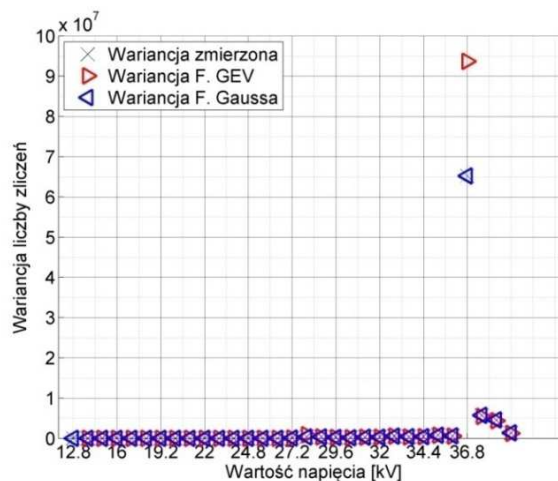
Estymowane wartości parametrów modeli regresyjnych.

Estymowane wartości parametrów modeli			
Nazwa	A	B	C
Wartość MG	69,82	20,60	69,82
Wartość MP	0,036	0,610	28,81

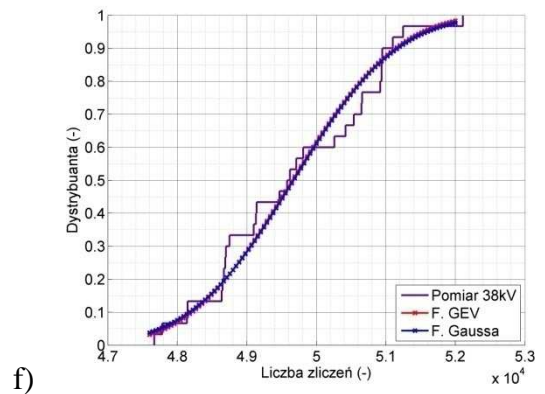
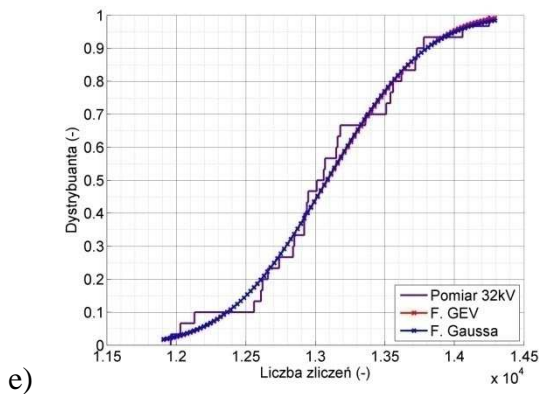
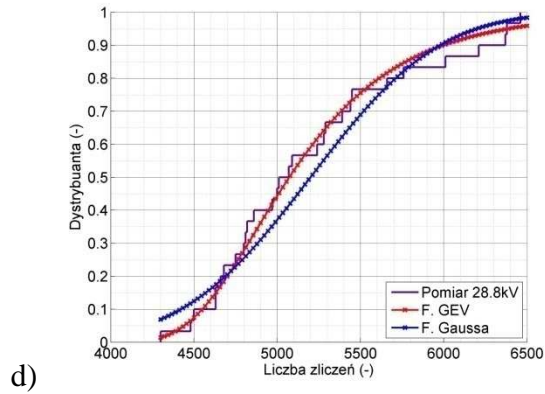
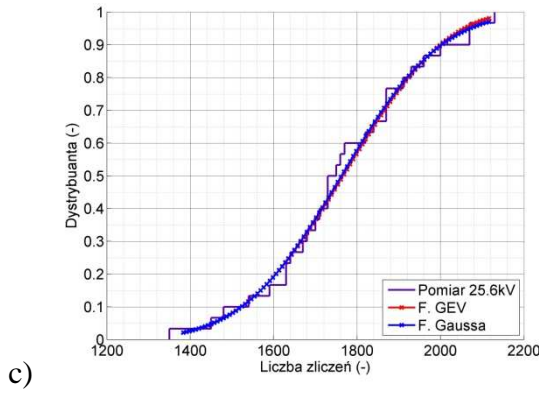
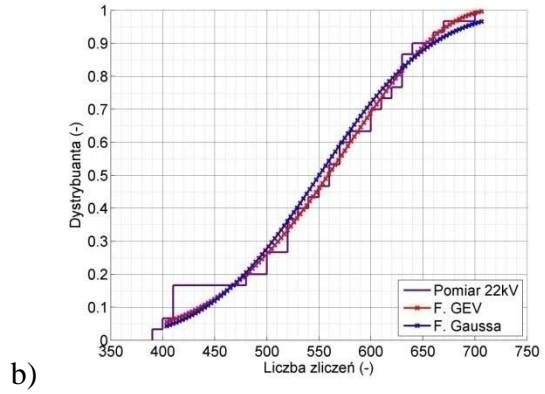
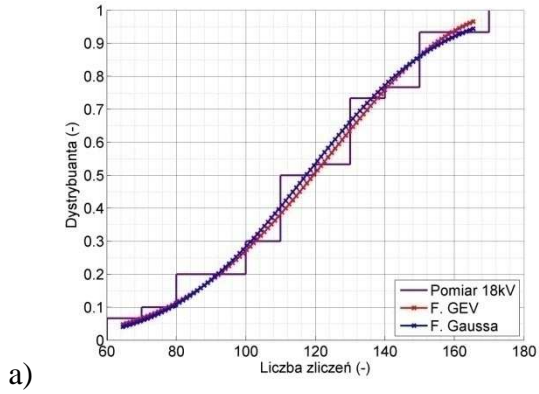
7.4. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego typu LS

Na rys. 7.22 przedstawiono zależność liczby punktów emisyjnych (wariancja) emitowanych przez wyładowania generowane na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego od wielkości podawanego napięcia. Krzyżykiem oznaczono wariancję zmiennej *liczba zliczeń* zarejestrowanych podczas pomiarów. Czerwonym trójkątem oznaczono wariancję uzyskaną z teoretycznego rozkładu obliczonego z wykorzystaniem funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Zaobserwowano wzrost wariancji dla napięcia 0,9 w odniesieniu do napięcia przebicia U_p . Zaprezentowane wartości są w większości przypadków wielkości zmierzonych i obliczonych jednakowe.

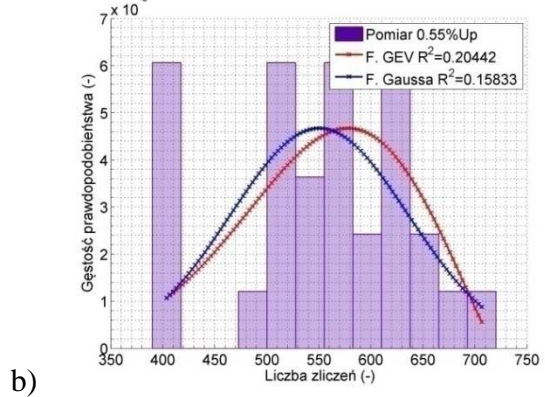
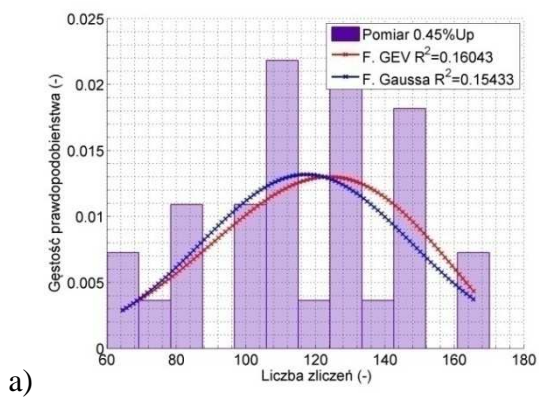
Na rys. 7.23 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ a) 0,45 b) 0,55 c) 0,64 d) 0,72 e) 0,8 f) 0,95 [w odniesieniu do U_p]. Na rys. 7.24 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,45 b) 0,55 c) 0,64 d) 0,72 e) 0,8 f) 0,95 [w odniesieniu do U_p]. Kolorem fioletowym zaznaczono dane dotyczące wyników pomiarów, kolorem czerwonym dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Obliczenie histogramów i określenie teoretycznych rozkładów liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) oraz empirycznych dystrybuant umożliwiło potwierdzenie stochastycznej natury badanego zjawiska. Analiza dystrybuant pozwoliła na określenie najczęściej występujących wartości liczby zliczeń dla poszczególnych napięć generacji WNZ. Rozkłady liczebności pozwoliły na określenie liczby modów rozkładu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ uzyskane rozkłady można opisać zarówno modelem GEV jak i Gaussa.

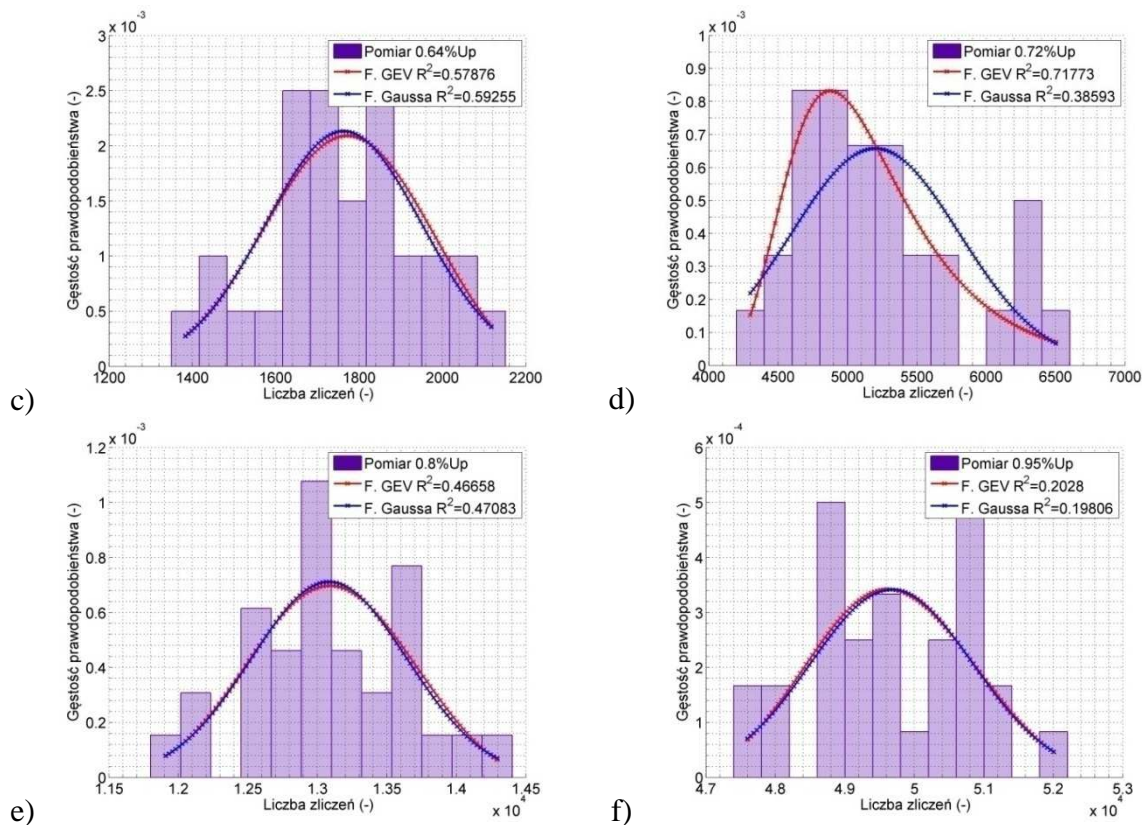


Rys. 7.22 Zależność wariancji zmiennej *liczba zliczeń* od wielkości podawanego napięcia.



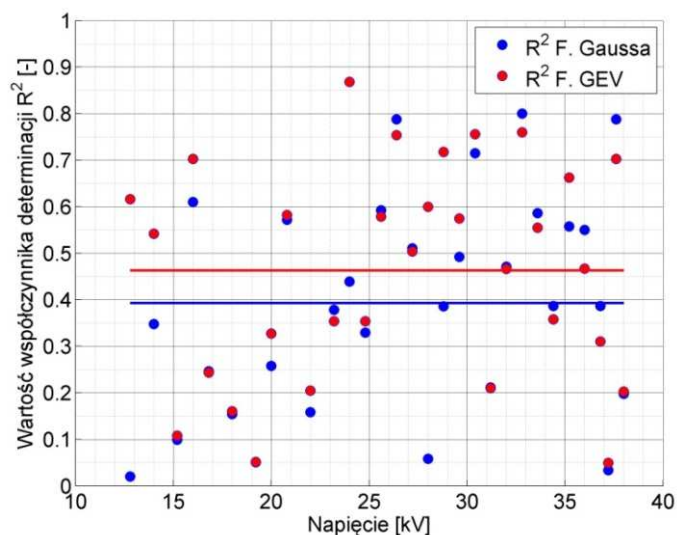
Rys. 7.23 Dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,45 U_p = 18 \text{ kV}$; b) $0,55 U_p = 22 \text{ kV}$; c) $0,64 U_p = 25,6 \text{ kV}$; d) $0,72 U_p = 28,8 \text{ kV}$; e) $0,8 U_p = 32 \text{ kV}$; f) $0,95 U_p = 38 \text{ kV}$.





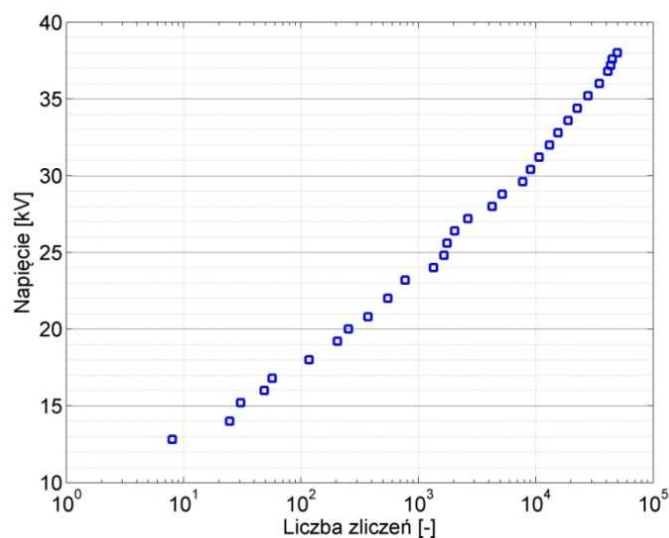
Rys. 7.24 Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,45 U_p =18 kV; b) 0,55 U_p =22 kV; c) 0,64 U_p =25,6 kV; d) 0,72 U_p =28,8 kV; e) 0,8 U_p =32 kV; f) 0,95 U_p =38 kV.

Na rys. 7.25 przedstawiono wartości współczynników determinacji R^2 obliczonego ze wzoru (4.5). Wartości obliczono dla wszystkich wyznaczonych rozkładów liczebności. Kolorem czerwonym zaznaczono dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - dla funkcji Gaussa. Dodatkowo linią ciągłą wskazano wartości średniej arytmetycznej. Przedstawione na rysunku 7.25 zestawienie umożliwiło podsumowanie wykonanej analizy stochastyczności, która wykazała, że charakter obserwowanej liczby punktów emisyjnych można dla wybranych wartości napięć generacji WNZ opisać obydwoma rozpatrywanymi rozkładami.



Rys. 7.25 Zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji obliczonych dla obu rozpatrywanych teoretycznych rozkładów liczebności w funkcji napięcia generacji WNZ.

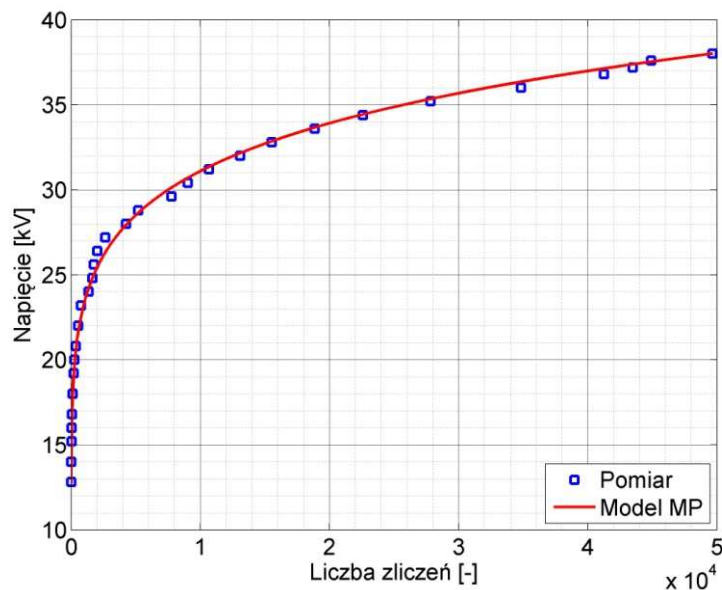
Na rys. 7.26 przedstawiono zależność wielkości napięcia podawanego na walec izolacyjny ceramiczny wypełniony kwarcem od uśrednionej liczby punktów emisyjnych emitowanych przez generowane wyładowania. Oś odciętych przedstawiono w skali logarytmicznej.



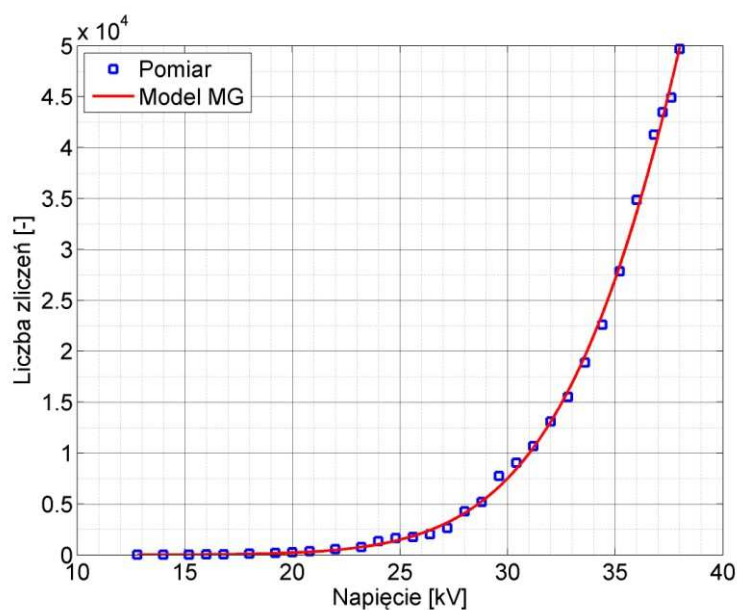
Rys. 7.26 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, wykres logarytmiczny.

Na rys. 7.27 kolorem niebieskim przedstawiono zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MP. Na rys. 7.28 kolorem niebieskim przedstawiono zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MG. W tabelicy 7.7 zestawiono wartości

parametrów dopasowania, obliczonych wg wzorów (4.10-13) dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. W tabelicy 7.8 zestawiono wartości estymowanych parametrów dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników *R-square* i *adj-R-square* stwierdzono jednakowo doskonale dopasowanie obu rozpatrywanych modeli. Natomiast wartości *RMSE* i *SSE*, które są znacząco bardziej zbliżone do zera dla modelu MP wskazują na możliwość zastosowania modelu MP do predykcji liczby punktów emisyjnych w zależności od napięcia generacji WNZ. Ze względu na wysokie wartości parametrów *RMSE* i *SSE* dla modelu MG nie należy zalecać jego stosowania do predykcji.



Rys. 7.27 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń* oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MP.



Rys. 7.28 Zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MG.

Obliczone wartości parametrów dopasowania modeli regresyjnych.

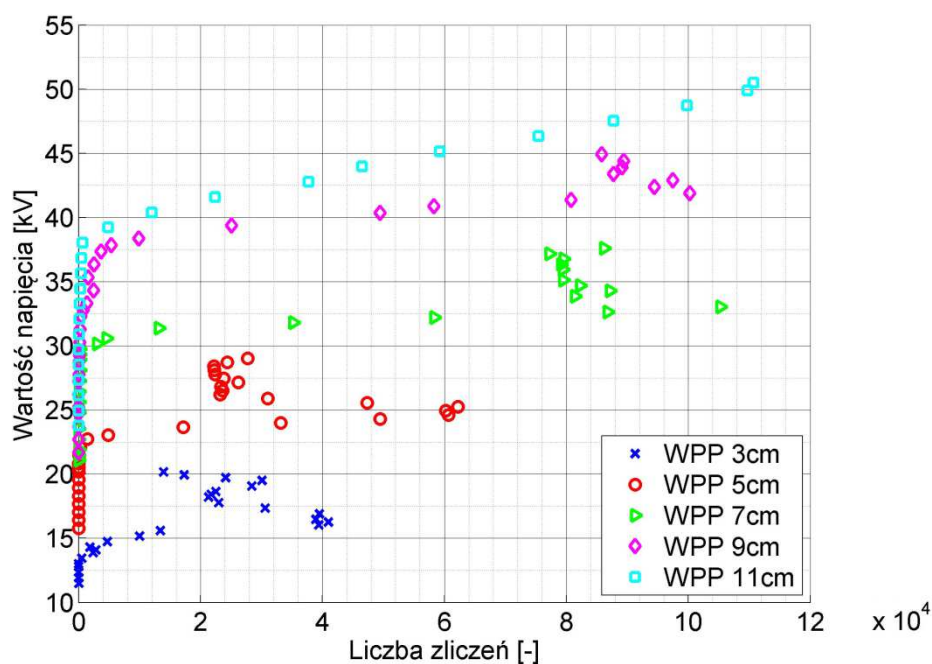
Zestawienie parametrów określających jakość dopasowania modeli do danych empirycznych					
Nazwa	SSE	R-square	dfe	adj-R-square	RMSE
Wartość MG	10728615	0,998	28	0,998	619
Wartość MP	4,268	0,997	28	0,997	0,39

Estymowane wartości parametrów modeli regresyjnych.

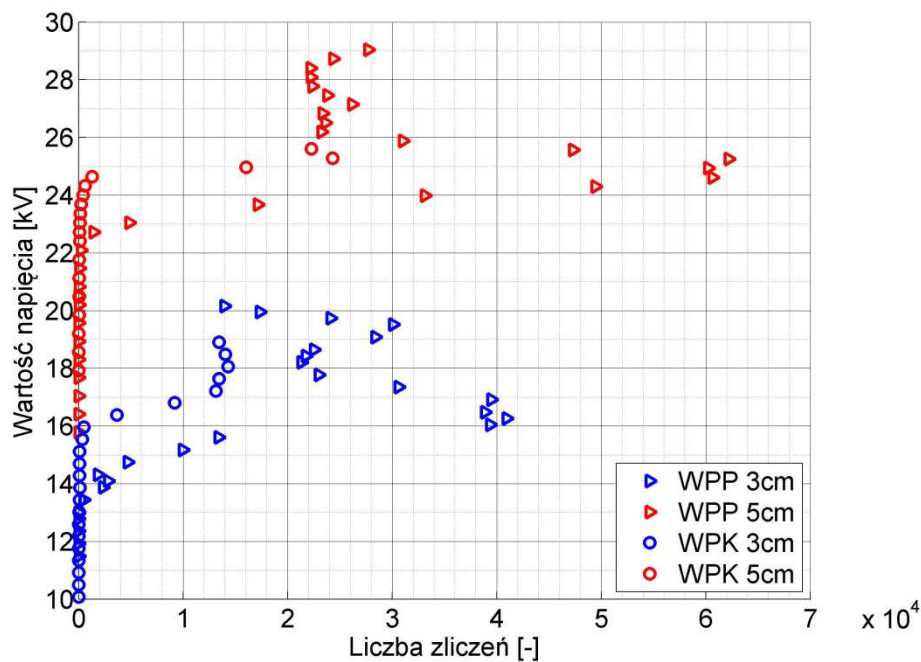
Estymowane wartości parametrów modeli			
Nazwa	A	B	C
Wartość MG	175879	51,753	12,253
Wartość MP	9,805	0,125	2,37e-05

7.5. Zestawienia porównawcze wyników uzyskanych z przeprowadzonych analiz zarejestrowanych metodą optyczną z wykorzystaniem kamery UV

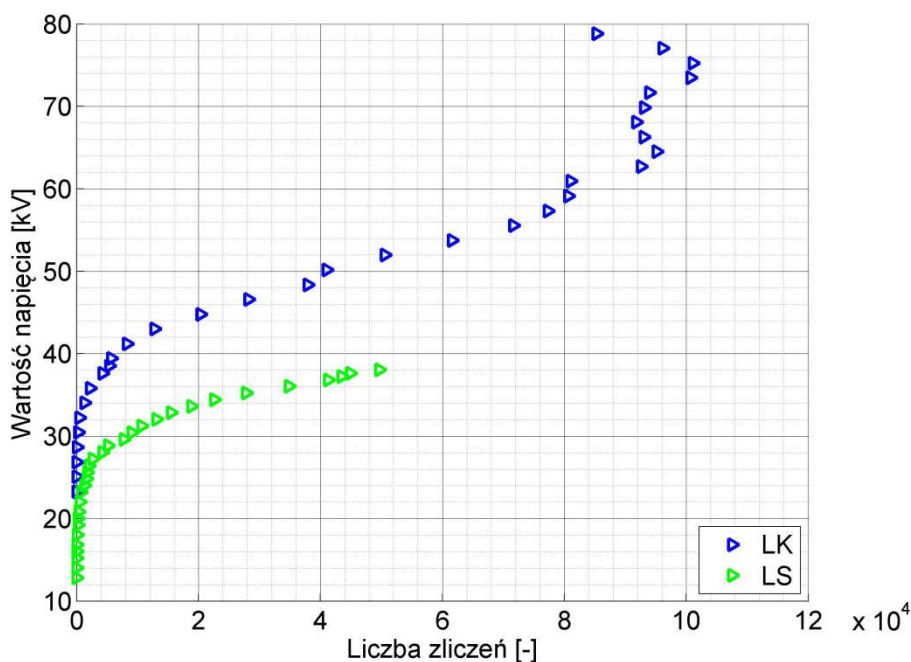
Na rys. 7.29 - 7.31 przedstawiono zestawienia porównawcze obrazujące różnice w liczbie punktów emisyjnych generowanych przez WNZ na powierzchniach przebadanych układów izolacyjnych. Wykresy dotyczą wpływu napięcia generacji WNZ na rejestrowaną liczbę zliczeń WNZ.



Rys. 7.29 Zestawienie porównawcze zależności napięcia generacji WNZ od liczby punktów emisyjnych występujących na powierzchni wypełnionego powietrzem walca izolacyjnego wykonanego z porcelany, dla różnych odległości między elektrodami.



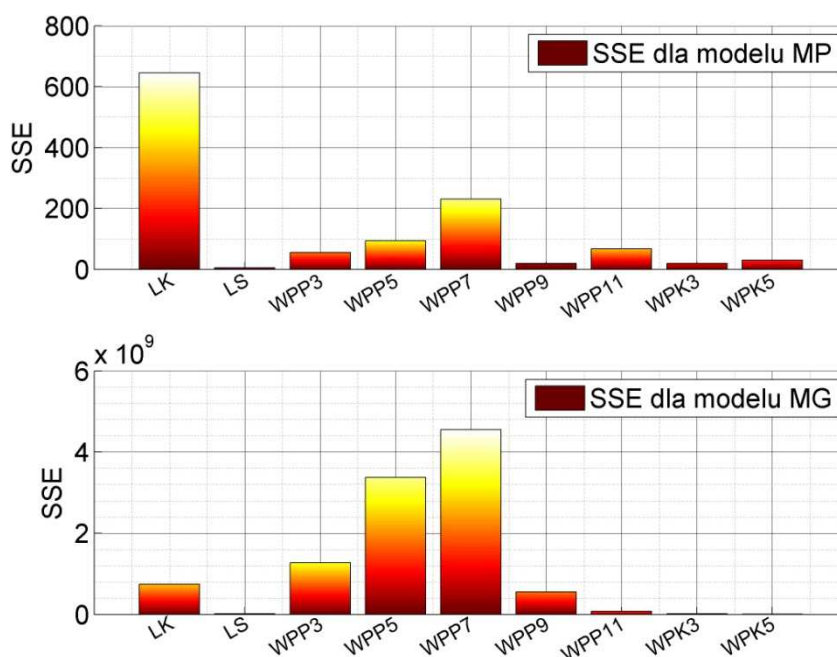
Rys. 7.30 Zestawienie porównawcze zależności napięcia generacji WNZ od liczby punktów emisyjnych występujących na powierzchni walca izolacyjnego wykonanego z porcelany wypełnionego powietrzem lub kwarcem, dla dwóch odległości między elektrodami.



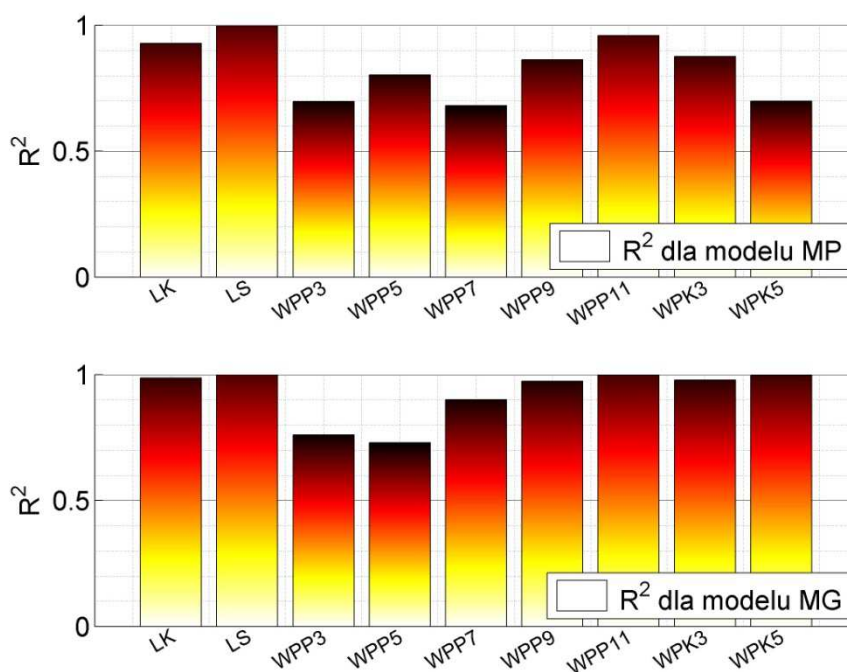
Rys. 7.31 Zestawienie porównawcze zależności napięcia generacji WNZ od liczby punktów emisyjnych występujących na powierzchni izolatorów: kołpakowego porcelanowego i porcelanowego długopniowego, podczas emisji WNZ przy tej samej odległości między elektrodami 11 cm.

Na rys. 7.32 - 7.35 przedstawiono zestawienia porównawcze obrazujące uśrednione wartości współczynników dopasowania modeli regresyjnych MP (wzór 4.7) i MG (wzór 4.9)

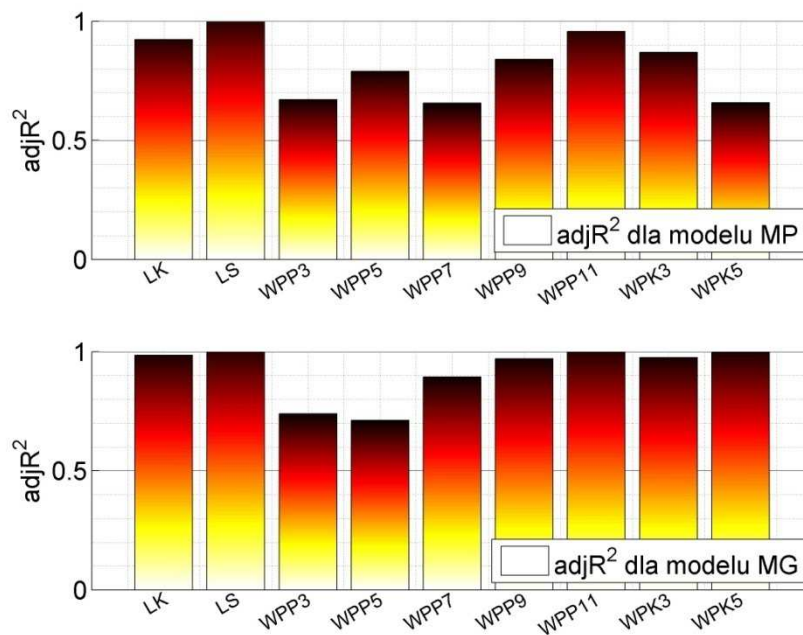
do danych empirycznych: SSE (wzór 4.10), R^2 (wzór 4.12), adj- R^2 (wzór 4.13) i RMSE (wzór 4.11).



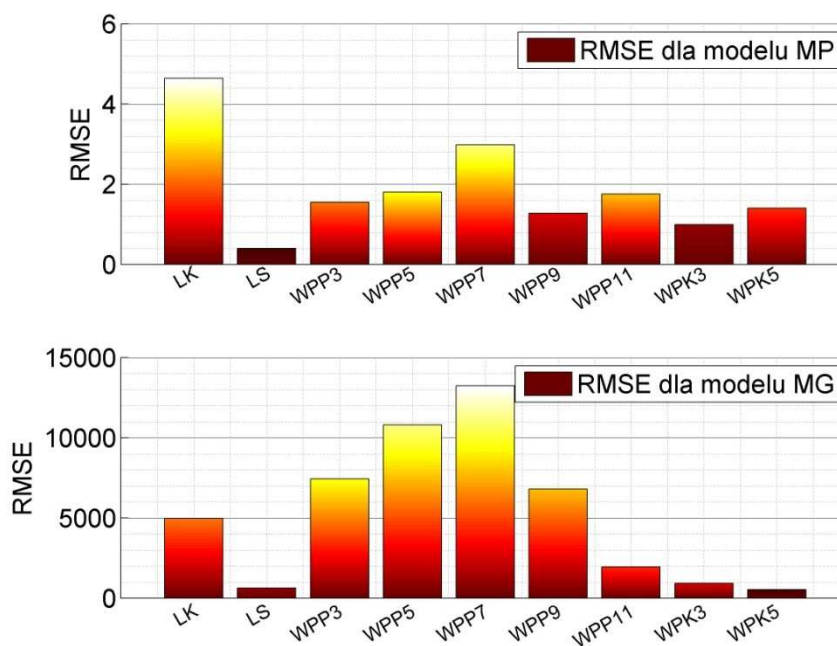
Rys. 7.32 Zestawienie porównawcze uśrednionych wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modeli MP i MG dla wszystkich badanych dielektryków ceramicznych.



Rys. 7.33 Zestawienie porównawcze uśrednionych wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modeli MP i MG dla wszystkich badanych dielektryków ceramicznych.

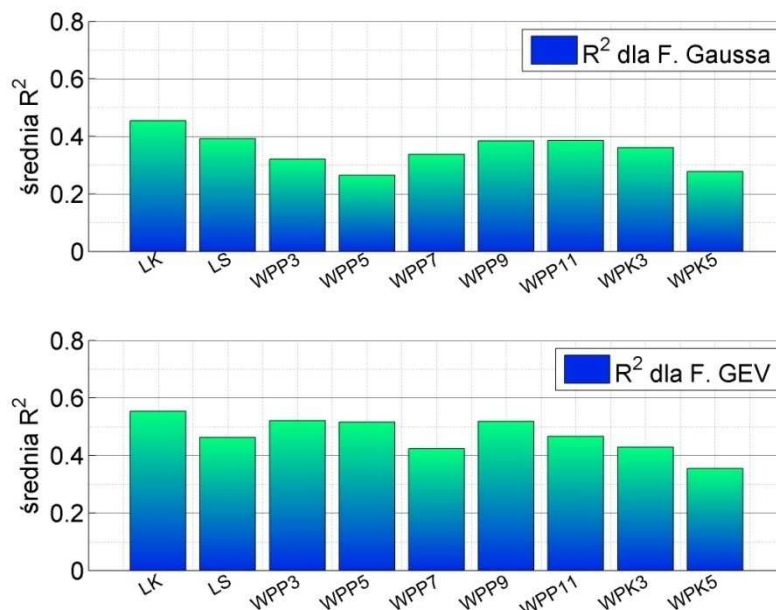


Rys. 7.34 Zestawienie porównawcze uśrednionych wartości współczynnika adj-R^2 uzyskanych w procesie regresji modeli MP i MG dla wszystkich badanych dielektryków ceramicznych.



Rys. 7.35 Zestawienie porównawcze uśrednionych wartości współczynnika RMSE uzyskanych w procesie regresji modeli MP i MG dla wszystkich badanych dielektryków ceramicznych.

Na rys. 7.36 przedstawiono zestawienie porównawcze obrazujące uśrednione wartości współczynnika determinacji R^2 , obliczonego ze wzoru (4.5), funkcji liczebności Gaussa i GEV do danych empirycznych dla wszystkich przebadanych dielektryków ceramicznych.



Rys. 7.36 Zestawienie porównawcze średnich wartości współczynnika determinacji R^2 uzyskanych w procesie regresji funkcji liczebności Gaussa i GEV dla wszystkich badanych dielektryków ceramicznych.

7.6. Najważniejsze konkluzje interpretacyjne

W tej części rozprawy przedstawiono szereg wyników pomiarów wykonanych z wykorzystaniem kamery UV, dotyczących detekcji WNZ występujących na powierzchni różnych dielektryków ceramicznych. Poniżej zestawiono najważniejsze konkluzje interpretacyjne wynikające z przeprowadzonych analiz:

- Wartość napięcia zasilającego badany dielektryk ma bezpośredni wpływ na liczbę rejestrowanych zliczeń punktów emisyjnych generowanych przez WNZ. Po przekroczeniu napięcia początkowego WNZ obserwuje się charakterystyczny, gwałtowny wzrost liczby zliczeń, która różni się w zależności od rodzaju dielektryka i odległości między elektrodami.
- W tabelicy 7.9 podano wartości napięć początkowych WNZ U_0 i U_{01} dla porcelanowych walców izolacyjnych wypełnionych kwarcem i powietrzem, dla wszystkich przyjętych odległości między elektrodami oraz dla izolatorów kołpakowego i długopniowego.
 - Wartość napięcia początkowego WNZ wzrasta wraz ze zwiększeniem odległości między elektrodami.
 - Różnica w wartościach napięcia początkowego U_0 dla WNZ występujących na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego podczas generacji WNZ przy odległościach 7 cm, 9 cm i 11 cm jest nieznaczna.

- Wypełnienie porcelanowego walca izolacyjnego dielektrykiem kwarcowym powoduje zwiększenie się wartości napięcia początkowego U_{01} o 2 kV, czyli o 8,7%. Natomiast na podstawie obserwacji wartości U_0 stwierdzono, że promieniowanie UV rejestrowane jest przy napięciu niższym o 1,4 kV.
- Wartość napięcia początkowego WNZ U_0 i U_{01} na izolatorze kołpakowych jest wyższa o ok. 10 kV w stosunku do izolatora długopniowego.

Tablica 7.9

Wartości napięć początkowych WNZ dla przebadanych układów izolacyjnych.

Wartość napięcia początkowego dla porcelanowych układów izolacyjnych									
-	WPP 3 cm	WPP 5 cm	WPP 7 cm	WPP 9 cm	WPP 11 cm	WPK 3 cm	WPK 5 cm	LK -	LS -
U_0	11,3 kV	15,2 kV	20,6 kV	21,3 kV	22,7 kV	9,9 kV	18,2 kV	23,3 kV	12 kV
U_{01}	13,4 kV	22,1 kV	29,7 kV	31,3 kV	34,4 kV	15,5 kV	24 kV	30,5 kV	20,8 kV

- Po przekroczeniu wartości napięcia początkowego U_{01} rejestrowana liczba punktów emisyjnych znacząco rośnie.
- W przypadku porcelanowego walca izolacyjnego najmniejszą liczbę zliczeń obserwuje się przy najmniejszej odległości. Przy odległości powyżej 7 cm, maksymalna liczba zliczeń jest podobna i nie przekracza wartości $11e^4$.
- Wypełnienie porcelanowego walca izolacyjnego dielektrykiem kwarcowym powoduje znaczne zmniejszenie rejestrowanej liczby WNZ: przy odległości 3 cm o prawie $3e^4$, przy odległości 5 cm o $3,5e^4$.
- Największa liczba rejestrowanej liczby zliczeń WNZ na powierzchni izolatora kołpakowego wynosi około $10e^4$. Na powierzchni izolatora długopniowego wynosiła ona $5e^4$.
- Analiza parametrów modelu MP (wzór 4.8.7), opisującego zależność liczby punktów emisyjnych w funkcji napięcia generacji WNZ, wskazuje co następuje:
 - Model MP został w wysokim stopniu prawidłowo dopasowany do danych empirycznych, na co wskazują uzyskane wartości parametru R^2 i $adj-R^2$, które dla wszystkich przypadków przekraczają wartość 0,68 i 0,67.
 - Najniższe dopasowanie uzyskano dla wyników otrzymanych z badania porcelanowego walca wypełnionego powietrzem podczas generacji WNZ przy odległości 3 i 5 cm i dla porcelanowego walca wypełnionego kwarcem przy odległości 5 cm.

- Najwyższe dopasowanie uzyskano dla wyników otrzymanych z izolatora długopniowego, dla którego wartość współczynnika R^2 i $adj-R^2$ przekroczyła 0,99.
- Na podstawie wartości SSE i $RMSE$ wykazano, że model MP skuteczniej można zastosować do celów predykcyjnych niż model MG.
 - Największe wartości $RMSE = \{ 4 - 9 \}$, otrzymano dla porcelanowego izolatora kołpakowego. Dla porcelanowego izolatora długopniowego uzyskano najmniejsze wartości $RMSE < 0,5$.
 - Największe wartości SSE otrzymano dla porcelanowego izolatora kołpakowego. Najmniejsze wartości $SSE < 10$ uzyskano dla porcelanowego izolatora długopniowego.
- Analiza parametrów modelu MG (wzór 4.8.9), opisującego wpływ napięcia generacji WNZ na liczbę emisyjnych, wskazuje, że:
 - Model MG został w wysokim stopniu prawidłowo dopasowany do danych empirycznych, na co wskazują uzyskane wartości parametru R^2 i $adj-R^2$, które dla wszystkich przypadków przekraczają wartość 0,73 i 0,71.
 - Najniższe dopasowanie uzyskano dla porcelanowego walca wypełnionego powietrzem podczas generacji WNZ przy odległości 3 cm i 5 cm.
 - Najwyższe dopasowanie uzyskano dla ceramicznego izolatora długopniowego, porcelanowego walca wypełnionego powietrzem, przy odległości 11cm i dla porcelanowego walca wypełnionego kwarcem, przy odległość 5cm, dla których wartość współczynnika R^2 i $adj-R^2$ przekroczyła 0,99.
 - Na podstawie bardzo dużych wartości SSE i $RMSE$ wykazano, że modelu MG nie należy zalecać do stosowania do celów predykcyjnych.
- Na podstawie analizy średniej arytmetycznej współczynnika determinacji obliczonego dla modeli zastosowanych do opisu teoretycznej funkcji liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) punktów opisujących widma emisyjne WNZ, którymi były: funkcja Gaussa i funkcja GEV, można przedstawić następujące konkluzje:
 - Dla funkcji Gaussa dla wszystkich przypadków uzyskano dopasowanie niezadawalające, tj. $R^2 < 0,5$.
 - Dla funkcji GEV dla układów LK, WPP3, WPP5, WPP9 uzyskano słabe dopasowanie ($R^2 = \{0,5 - 0,6\}$), dla pozostałych dielektryków lub układów izolacyjnych dopasowanie jest niezadawalające ($R^2 < 0,5$).

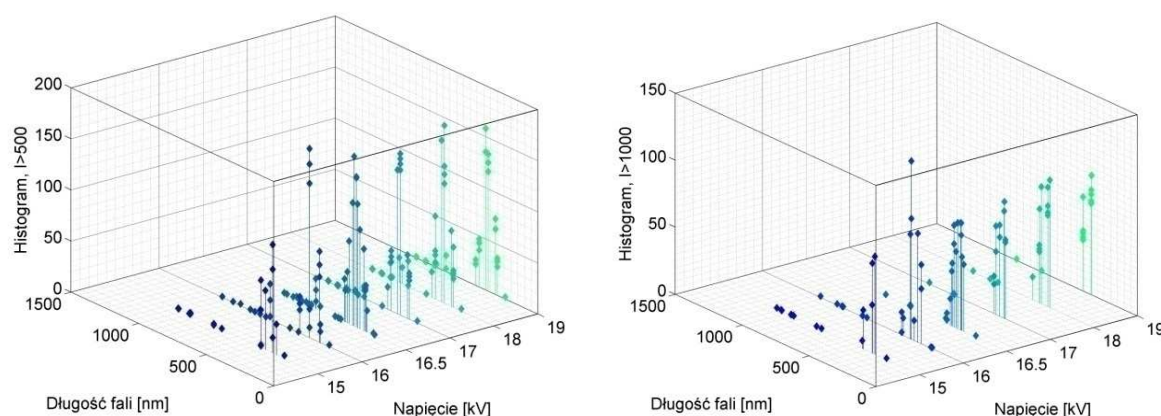
- o Analiza wartości współczynników determinacji obliczonych dla wszystkich rozpatrywanych układów i odległości między elektrodami, dla obu funkcji gęstości prawdopodobieństwa wykazała, że uzyskuje się dobre i bardzo dobre dopasowania dla niektórych wartości napięć generacji WNZ. Natomiast nie zaobserwowano istotnej korelacji między dopasowaniem funkcji teoretycznych do rozkładów empirycznych, a wartością napięcia generacji WNZ.

8. Numeryczne opracowanie wyników uzyskanych metodą spektrofotometrii, ich analiza i interpretacja

8.1. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, odległość między elektrodami 3 cm

8.1.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych

Na rys. 8.1 przedstawiono zbiorcze zestawienie histogramów obliczonych dla widm o największych wartościach intensywności uzyskanych podczas pomiarów w funkcji napięcia generacji WNZ. Wykres po lewej stronie dotyczy intensywności przekraczających wartość 500 ($I > 500$), wykres po prawej - intensywności przekraczających wartość 1000 ($I > 1000$). Na podstawie tej analizy możliwe jest określenie częstości występowania emisji świetlnej generowanej przez WNZ o danej długości fali.



Rys. 8.1 Zestawienie zbiorcze histogramów widm intensywności dla różnych wartości napięć. Po lewej: $I > 500$. Po prawej: $I > 1000$.

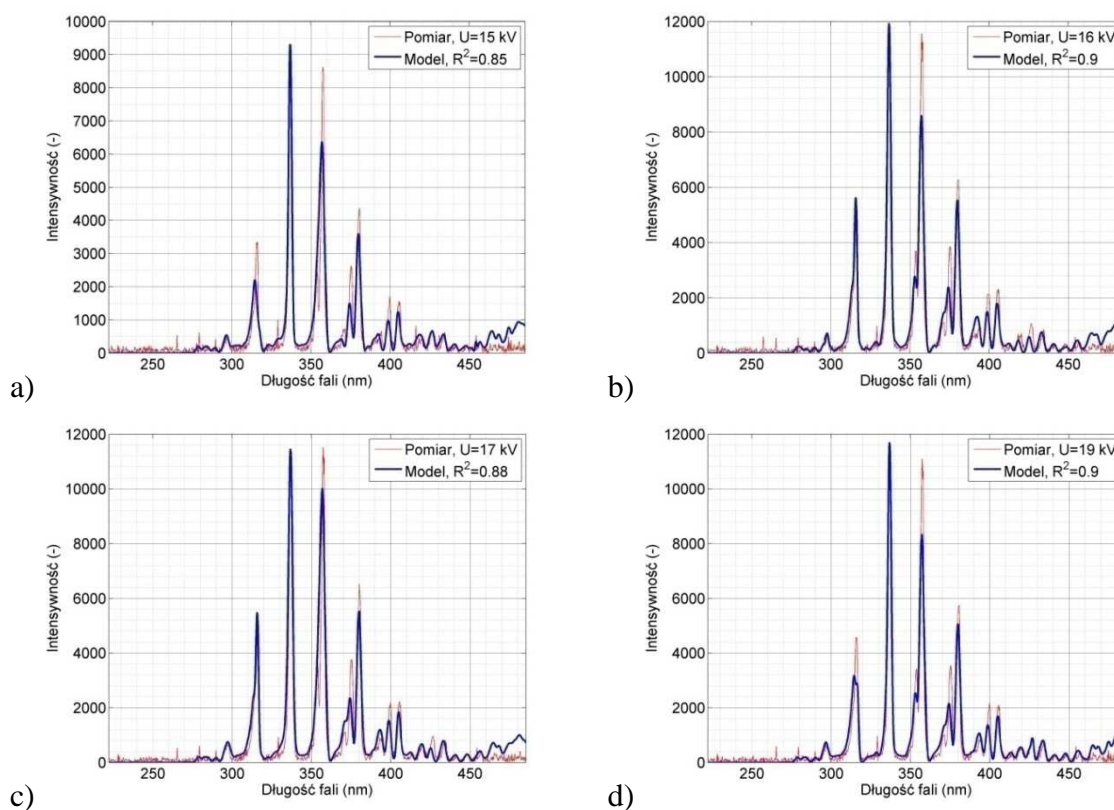
Na podstawie otrzymanych histogramów dla wartości intensywności przekraczających 1000, określono w poszczególnych przedziałach długości dominujących fal świetlnych pojawiające się w zarejestrowanych sygnałach, które zestawiono w tabelicy 8.1.

Długości dominujących fal występujących w emisji świetlnej wykazującej wartość $I > 1000$.

Przedział długości fal [nm]	Wartości i przedziały długości dominujących fal występujące w emisji świetlnej wykazujące wartość intensywności $I > 1000$ [nm]
$\lambda = [200 - 299]$	203, 296-298
$\lambda = [300 - 399]$	311-318, 333-340, 351-360, 369-382, 390-396, 397-399
$\lambda = [400 - 499]$	400-401, 404-407, 420, 425-428, 434-435
$\lambda > 500$	745, 933, 1073

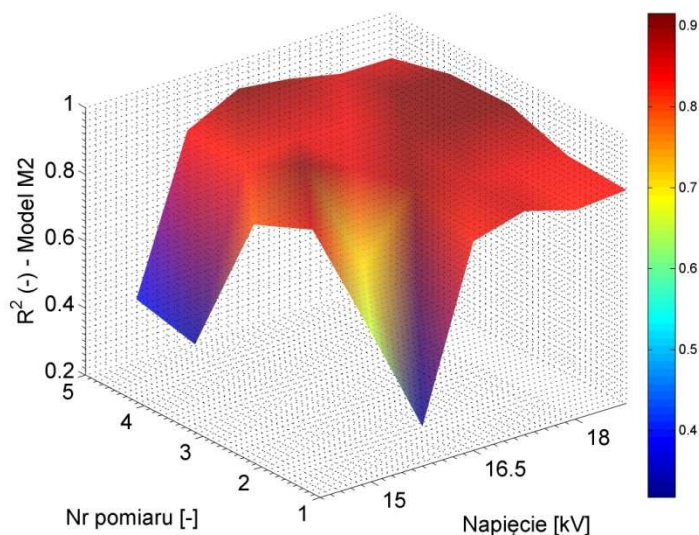
8.1.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa

Na rys. 8.2 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem szeregu Gaussa (wzór 4.16 - model M2) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik pomiarów, kolorem niebieskim - wynik modelowania. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



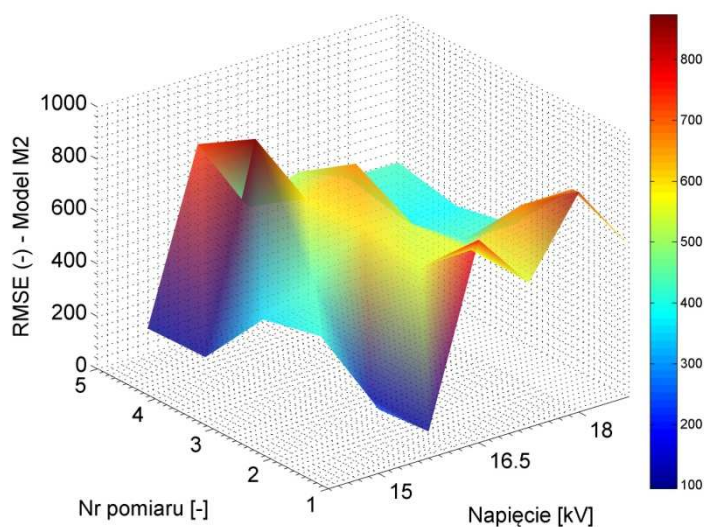
Rys. 8.2 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) 0,75 $U_p = 15$ kV, b) 0,80 $U_p = 16$ kV, c) 0,85 $U_p = 17$ kV, d) 0,94 $U_p = 19$ kV.

Na rys. 8. 3-8. 5 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem szeregu Gaussa (model M2), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.

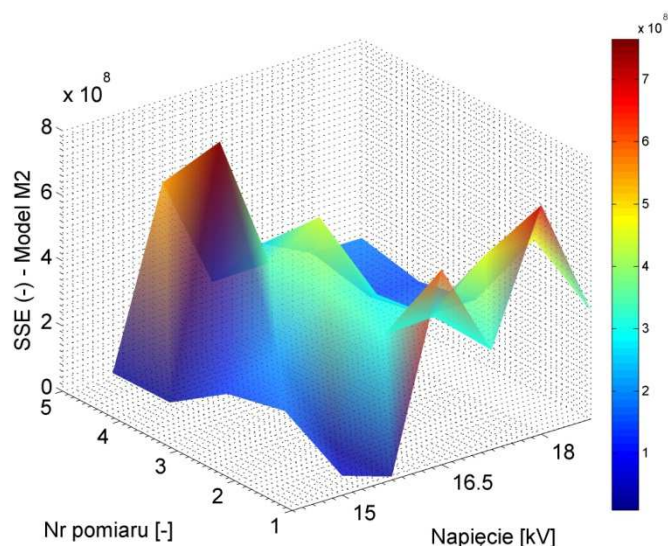


Rys. 8.3 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M2 w przeważającej większości przypadków uzyskuje dobre i bardzo dobre dopasowanie, o czym świadczą wartości bliskie jedności. Jedynie dla mniejszych napięć generacji WNZ uzyskano brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach.

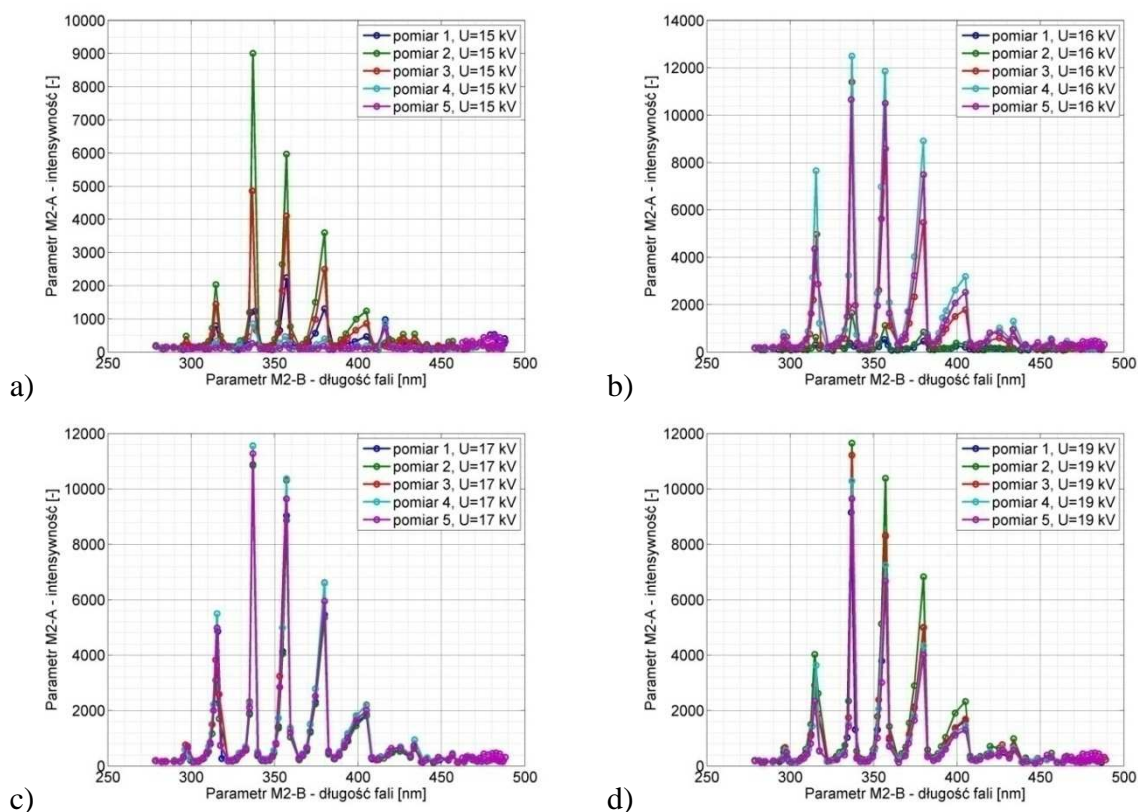


Rys. 8.4 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

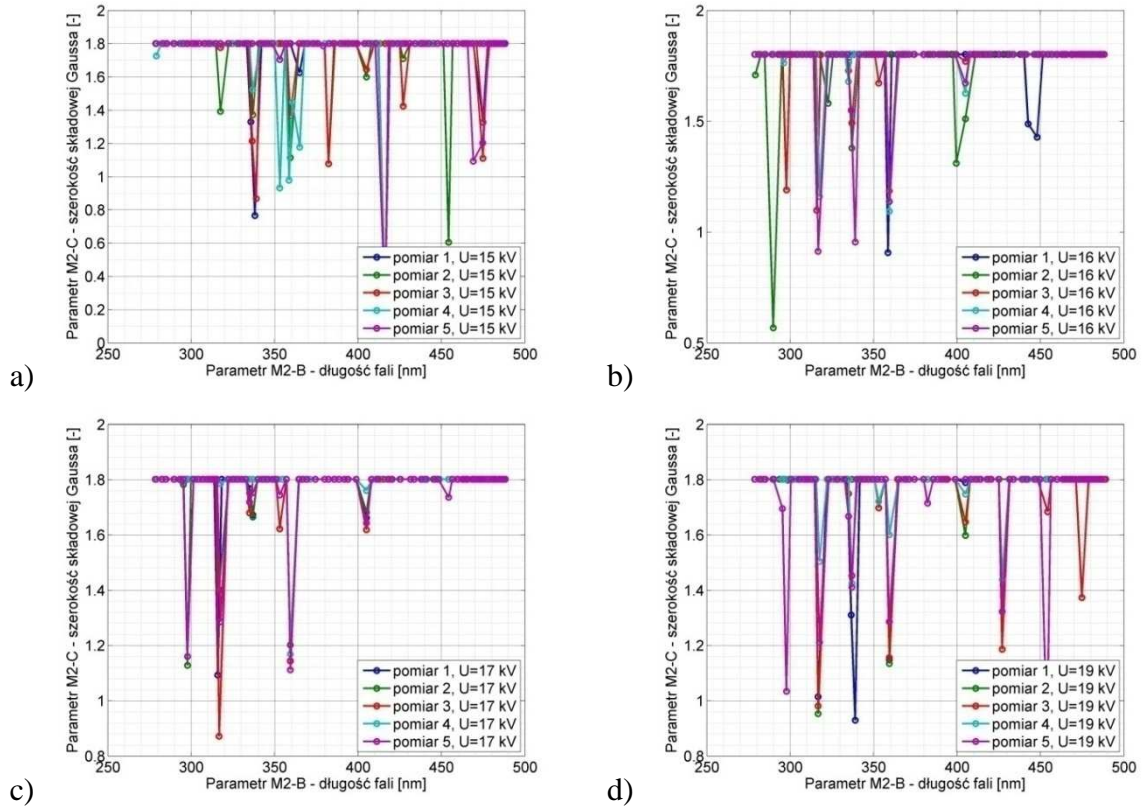


Rys. 8.5 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynników $RMSE$ i SSE , które osiągają wartości powyżej 100 stwierdzono brak możliwości zastosowania tego modelu do celów predykcyjnych. Na rys. 8.6-8.7 przedstawiono wartości parametrów A względem B i parametrów C względem B, uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ.



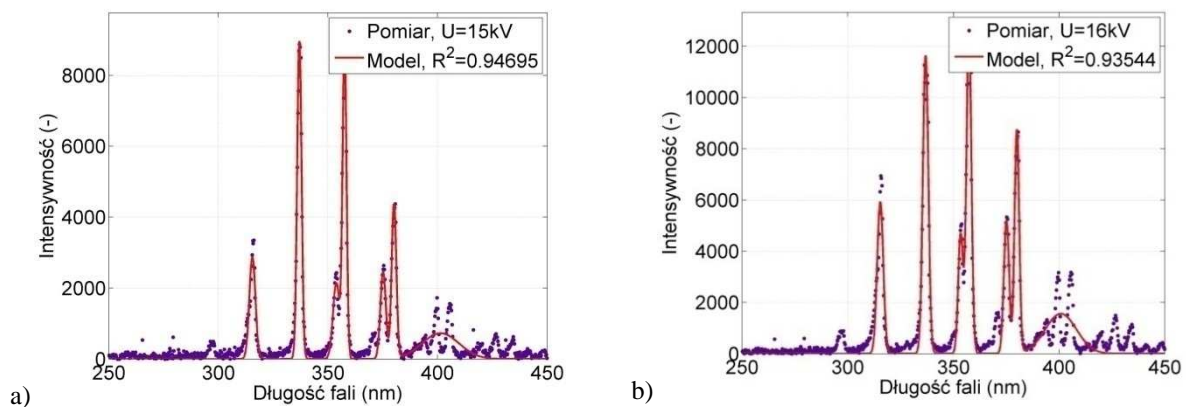
Rys. 8.6 Wartości parametrów A względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,75 U_p = 15$ kV, b) $0,80 U_p = 16$ kV, c) $0,85 U_p = 17$ kV, d) $0,94 U_p = 19$ kV.

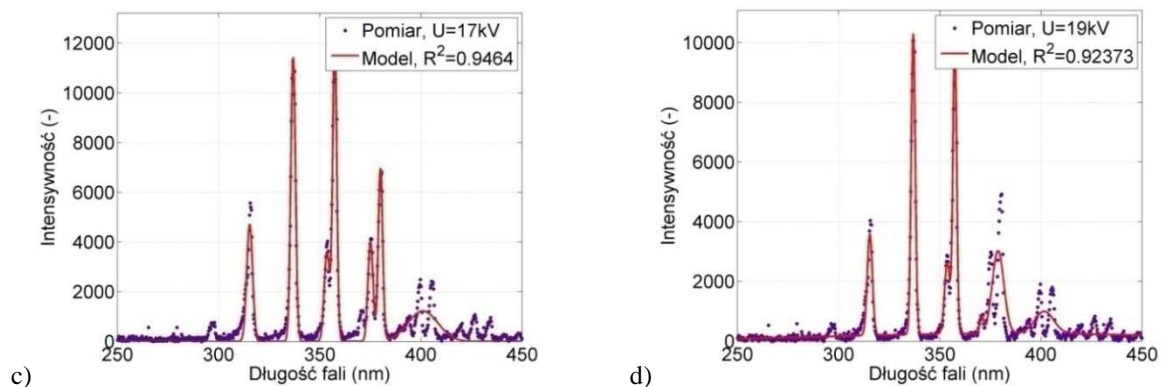


Rys. 8.7 Wartości parametrów C względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,75 $U_p = 15$ kV, b) 0,80 $U_p = 16$ kV, c) 0,85 $U_p = 17$ kV, d) 0,94 $U_p = 19$ kV.

8.1.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa

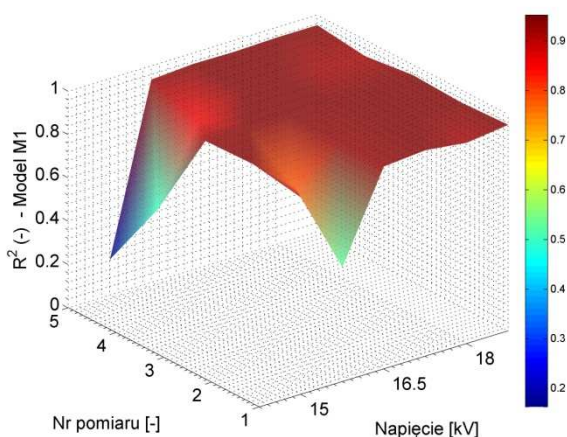
Na rys. 8.8 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (wzór 4.17 - model M1) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik modelowania, kolorem fioletowym - wynik pomiarów. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



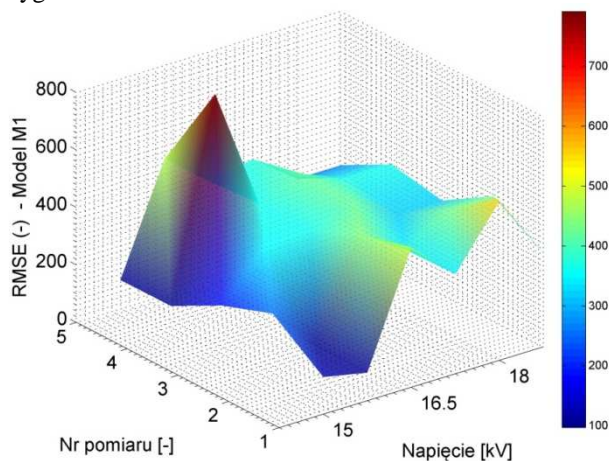


Rys. 8.8 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,75 U_p = 15$ kV, b) $0,80 U_p = 16$ kV, c) $0,85 U_p = 17$ kV, d) $0,94 U_p = 19$ kV.

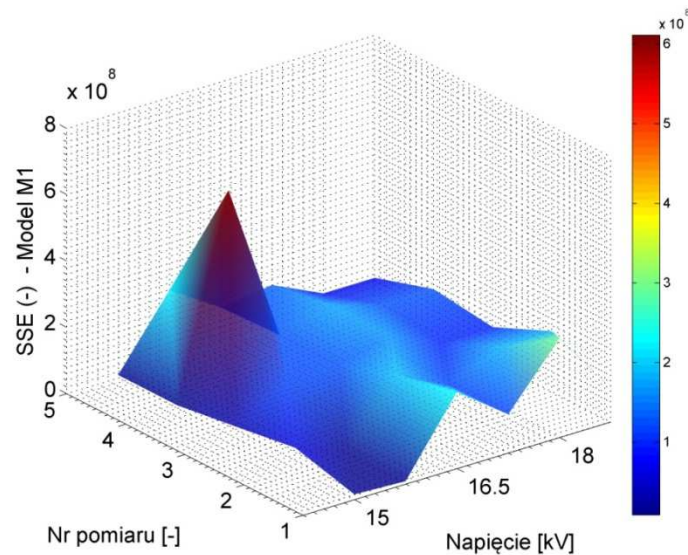
Na rys. 8.9-8.11 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (model M1), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.



Rys. 8.9 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

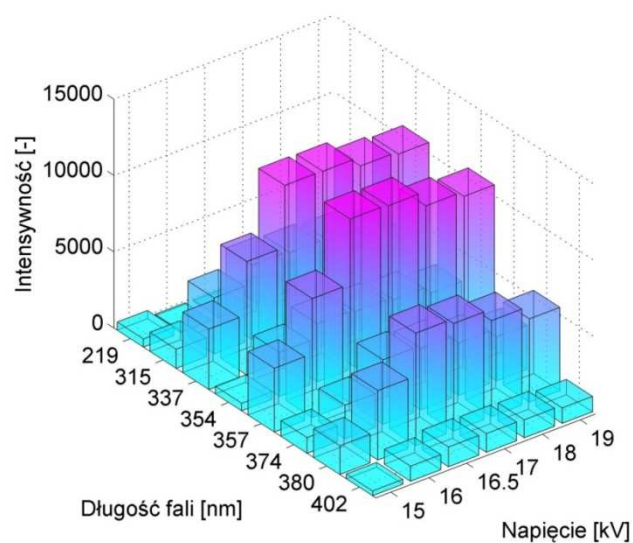


Rys. 8.10 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



Rys. 8.11 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M1 w przeważającej większości przypadków uzyskuje bardzo dobre dopasowanie, o czym świadczą wartości bliskie jedności. Jedynie w pojedynczych przypadkach dla najniższych napięć generacji WNZ uzyskano słabe lub brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach. Zastosowanie modelu M1 pozwoliło na dokładne określenie intensywności i długości najbardziej dominujących fal świetlnych w rejestrowanym widmie emitowanym przez WNZ. Na rys. 8.12 przedstawiono intensywności poszczególnych długości fal w zależności od wartości napięcia zasilającego badany układ.



Rys. 8.12 Zależność intensywności poszczególnych składowych widma, uzyskanego w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M1, w funkcji napięcia generacji WNZ.

8.2. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego kwarcem, odległość między elektrodami 5 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm

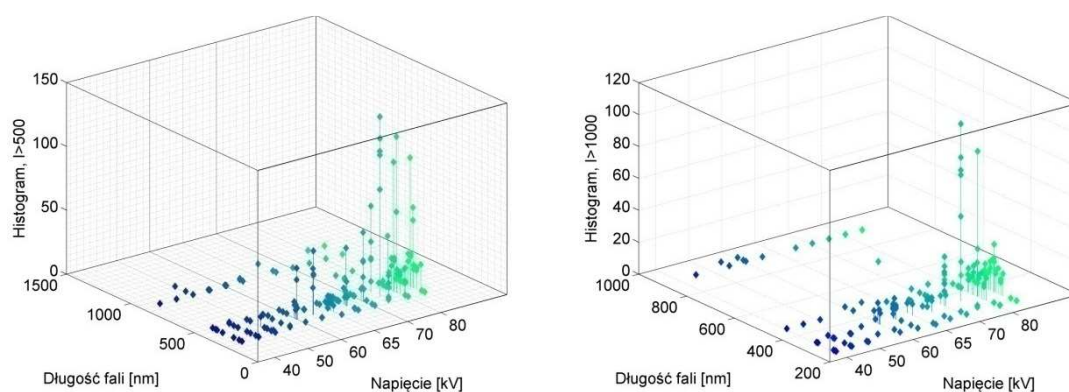
Analizę widm emisyjnych od wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego walca izolacyjnego wypełnionego dielektrykiem kwarcowym przy czterech kolejnych odległościach między elektrodami (5 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm) metodologicznie i jakościowo wykonano według takiej samej metody jak dla odległości między elektrodami 3 cm (podrozdział 8.1).

Wyniki analiz odnoszące się do widm emisyjnych wyładowań generowanych przy czterech odległościach między elektrodami (5 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm) przedstawiono w Załączniku nr 3 niniejszej rozprawy.

8.3. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego izolatora kołpakowego typu LK

8.3.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych

Na rys. 8.13 przedstawiono zbiorcze zestawienie histogramów obliczonych dla widm o największych wartościach intensywności uzyskanych podczas pomiarów w funkcji napięcia generacji WNZ. Wykres po lewej dotyczy intensywności przekraczających wartość 500 ($I > 500$), wykres po prawej - intensywności przekraczających wartość 1000 ($I > 1000$). Na podstawie tej analizy możliwe jest określenie częstości występowania emisji świetlnej generowanej przez WNZ o danej długości fali.



Rys. 8.13 Zestawienie zbiorcze histogramów widm intensywności dla różnych wartości napięć. Po lewej: $I > 500$. Po prawej: $I > 1000$.

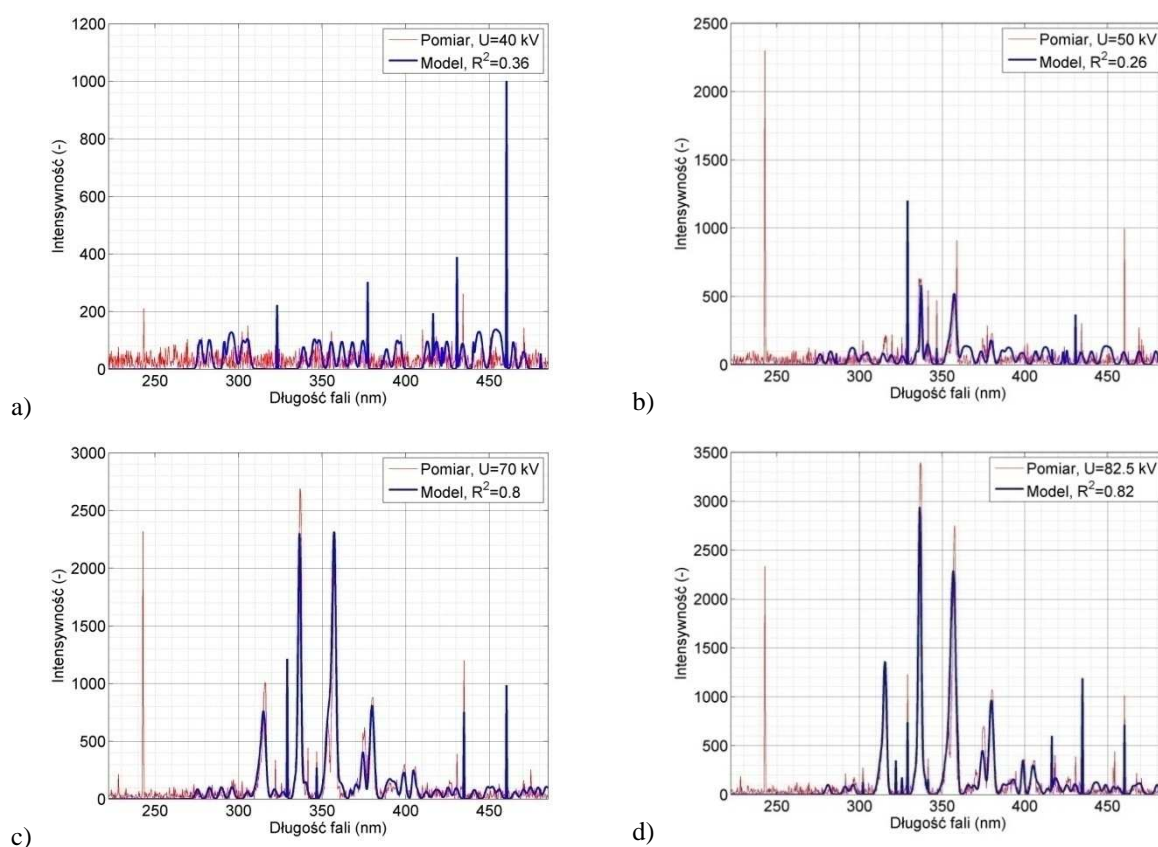
Na podstawie otrzymanych histogramów dla wartości intensywności przekraczających 1000 określono długości fal świetlnych pojawiających się w zarejestrowanych sygnałach, które zestawiono w tabelicy 8.2.

Długości dominujących fal występujących w emisji świetlnej wykazującej wartość $I > 1000$.

Przedział długości fal [nm]	Wartości i przedziały długości dominujących fal występujące w emisji świetlnej wykazujące wartość intensywności $I > 1000$ [nm]
$\lambda = [200 - 299]$	243
$\lambda = [300 - 399]$	312-317, 329, 333-339, 352-371, 373-382, 398-399
$\lambda = [400 - 499]$	400, 404-406, 435, 460
$\lambda > 500$	724, 933

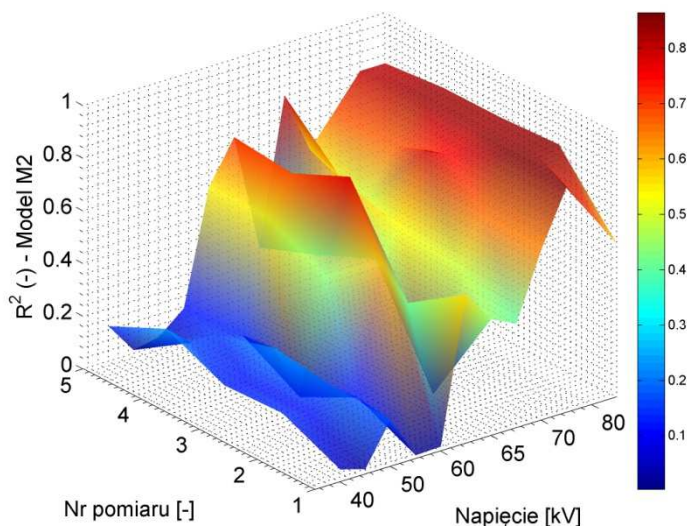
8.3.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa

Na rys. 8.14 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem szeregu Gaussa (wzór 4.16 - model M2) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik pomiarów, kolorem niebieskim - wynik modelowania. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



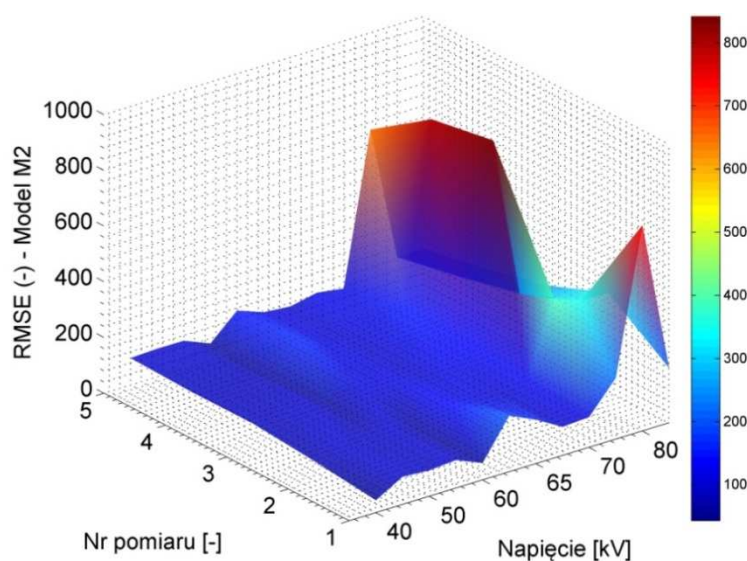
Rys. 8.14 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,44 U_p = 40 \text{ kV}$, b) $0,55 U_p = 50 \text{ kV}$, c) $0,77 U_p = 70 \text{ kV}$, d) $0,90 U_p = 82,5 \text{ kV}$.

Na rys. 8.15-8.17 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem szeregu Gaussa (model M2), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.

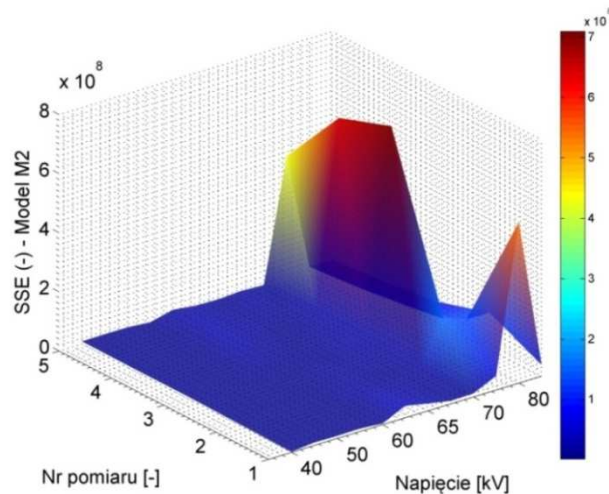


Rys. 8.15 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M2 w większości przypadków uzyskuje dobre i bardzo dobre dopasowanie.. Jedynie dla mniejszych napięć generacji WNZ uzyskano słabe lub brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach.

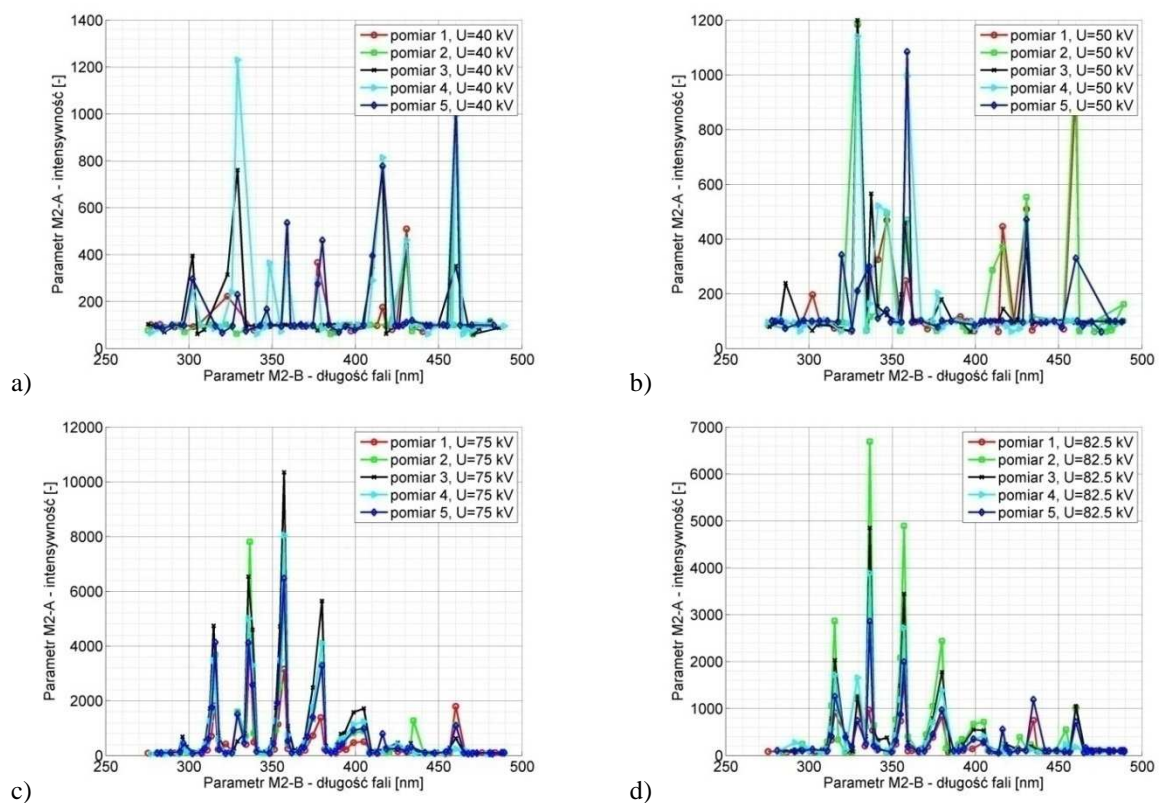


Rys. 8.16 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

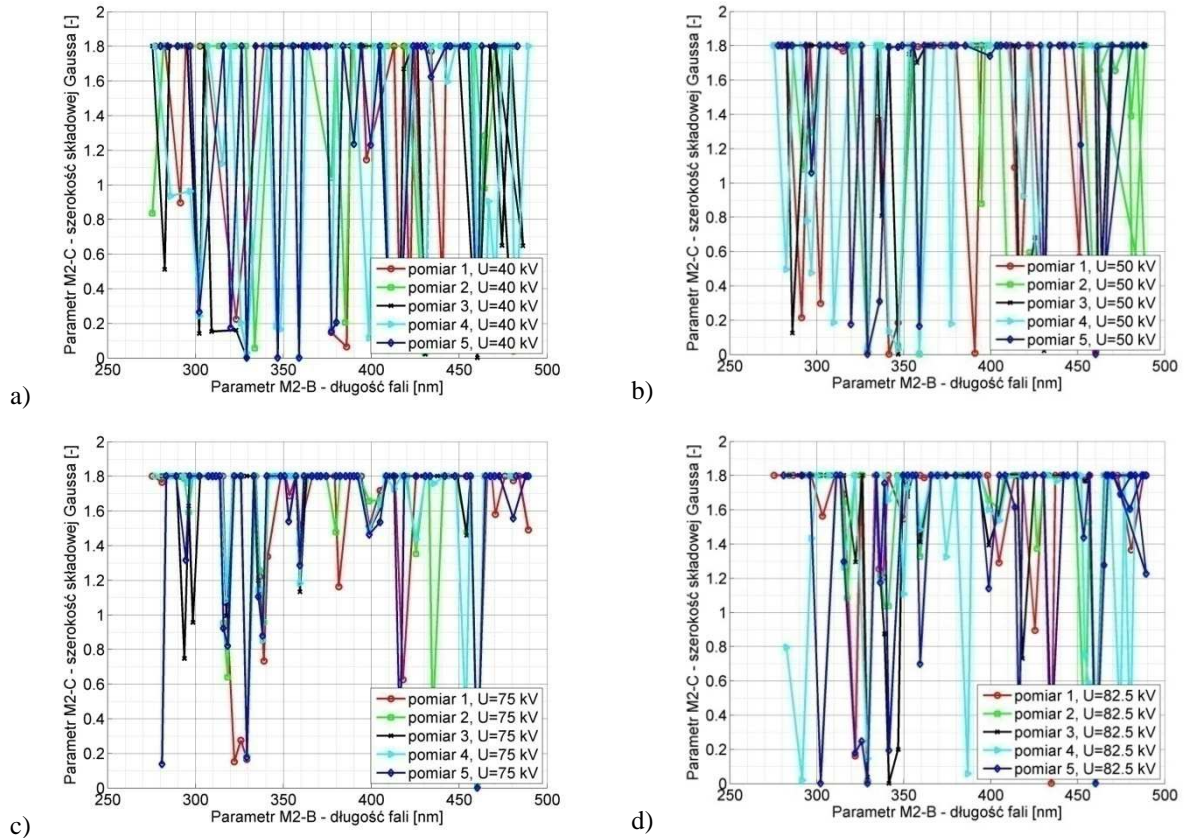


Rys. 8.17 Zestawienie wartości współczynnika *SSE* uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynników *RMSE* i *SSE*, które osiągają wartości powyżej 100 stwierdzono brak możliwości zastosowania tego modelu do celów predykcyjnych. Na rys. 8.18-8.19 przedstawiono wartości parametrów A względem B i parametrów C względem B, uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ.



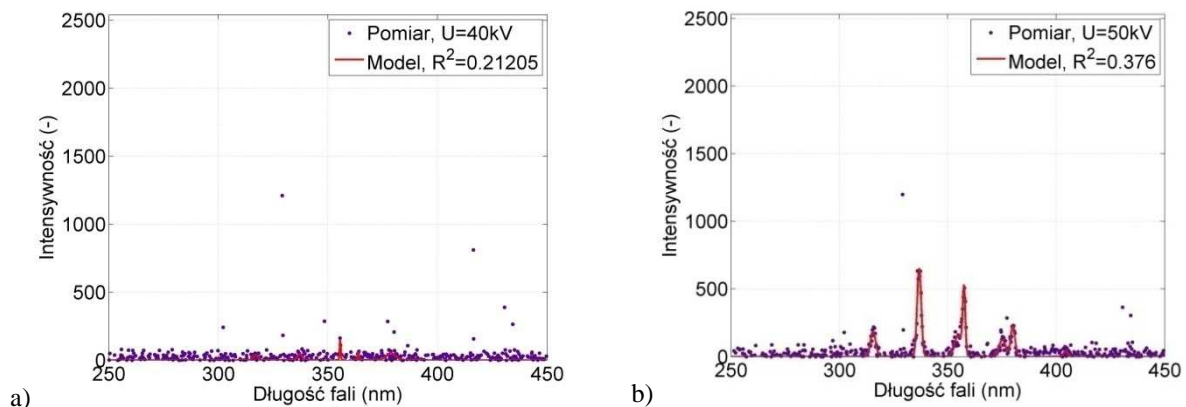
Rys. 8.18 Wartości parametrów A względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,44 U_p = 40$ kV, b) $0,55 U_p = 50$ kV, c) $0,77 U_p = 70$ kV, d) $0,90 U_p = 82,5$ kV.

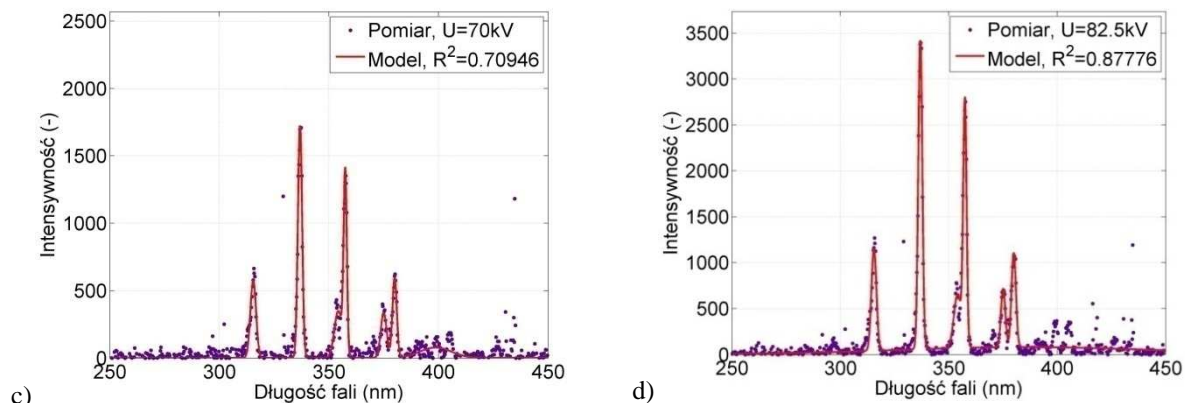


Rys. 8.19 Wartości parametrów C względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,44 U_p = 40$ kV, b) $0,55 U_p = 50$ kV, c) $0,77 U_p = 70$ kV, d) $0,90 U_p = 82,5$ kV.

8.3.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa

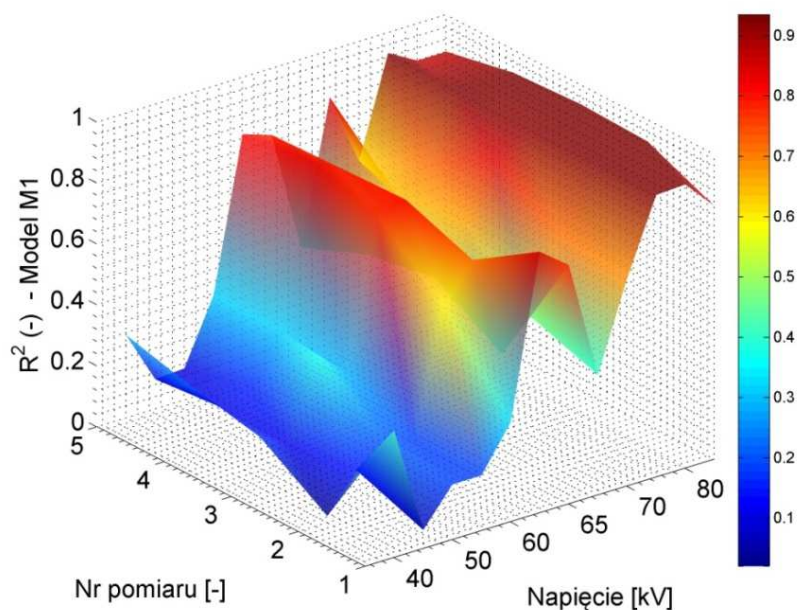
Na rys. 8.20 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (wzór 4.17 - model M1) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik modelowania, kolorem fioletowym - wynik pomiarów. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



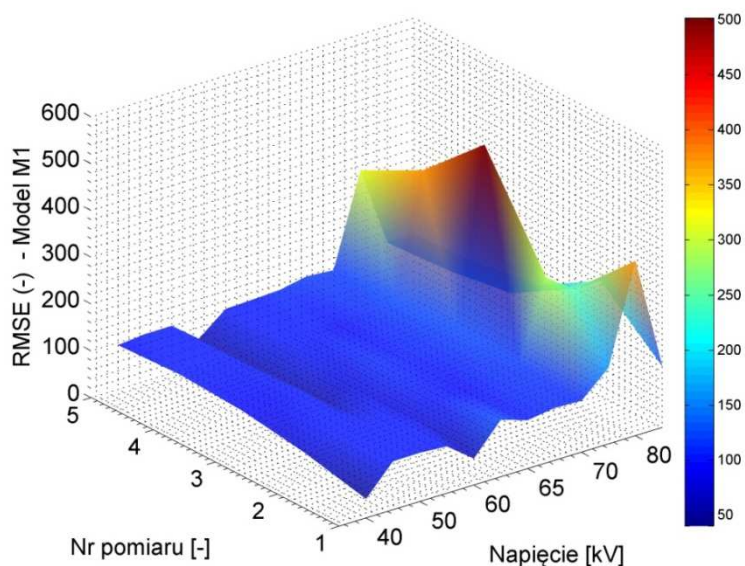


Rys. 8.20 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,44 U_p = 40\text{ kV}$, b) $0,55 U_p = 50\text{ kV}$, c) $0,77 U_p = 70\text{ kV}$, d) $0,90 U_p = 82,5\text{ kV}$.

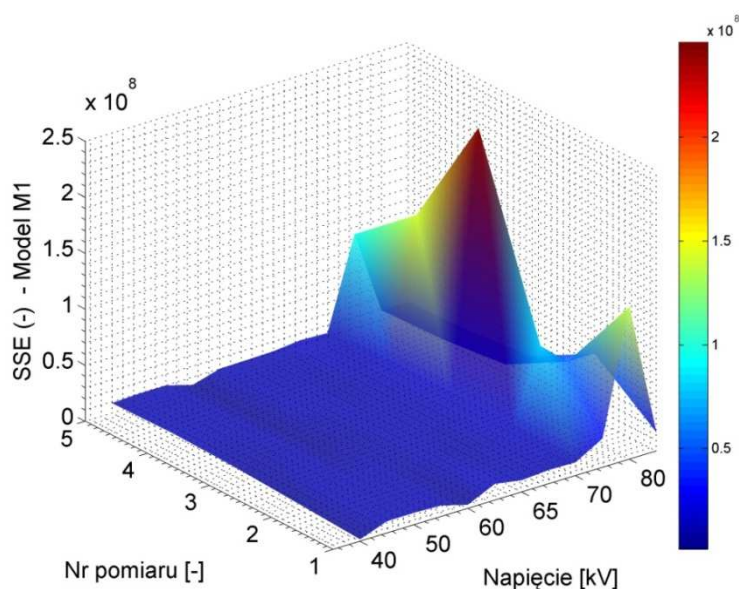
Na rys. 8.21-8.23 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (model M1), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.



Rys. 8.21 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



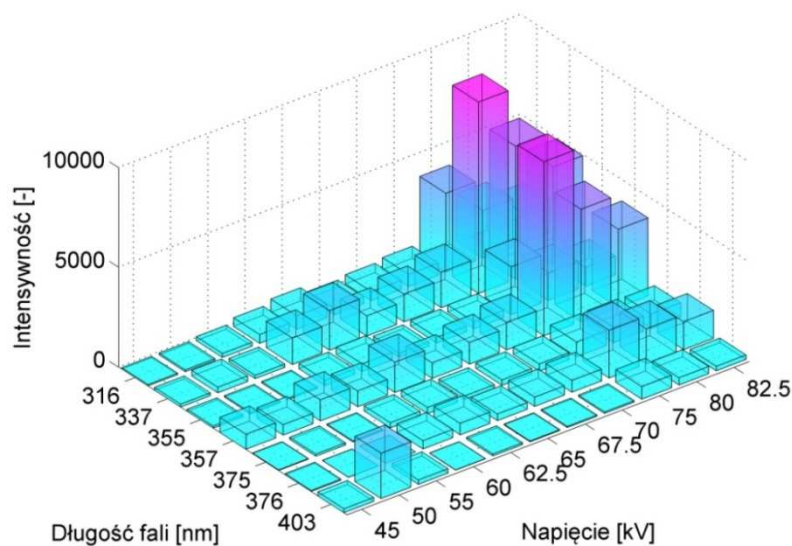
Rys. 8.22 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



Rys. 8.23 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M1 w większości przypadków uzyskuje dobre i bardzo dobre dopasowanie, o czym świadczą wartości powyżej 0,6. Jedynie dla najmniejszych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach. Zastosowanie modelu M1 pozwoliło na dokładne określenie intensywności i długości najbardziej dominujących fal świetlnych w rejestrowanym widmie emitowanym przez WNZ. Na rys. 8.24

przedstawiono intensywności poszczególnych długości fal w zależności od wartości napięcia zasilającego badany układ.

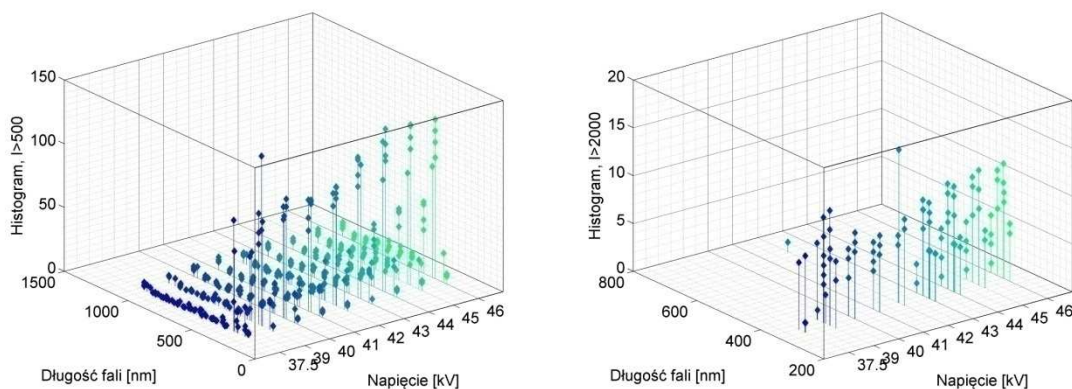


Rys. 8. 24 Zależność intensywności poszczególnych składowych widma, uzyskanego w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M1, w funkcji napięcia generacji WNZ.

8.4. Analiza widm emisyjnych wyładowań występujących na powierzchni porcelanowego izolatora długopniowego typu LS

8.4.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych

Na rys. 8.25 przedstawiono zbiorcze zestawienie histogramów obliczonych dla widm o największych wartościach intensywności uzyskanych podczas pomiarów w funkcji napięcia generacji WNZ. Wykres po lewej dotyczy intensywności przekraczających wartość 500 ($I > 500$), wykres po prawej - intensywności przekraczających wartość 2000 ($I > 2000$). Na podstawie tej analizy możliwe jest określenie częstości występowania emisji świetlnej generowanej przez WNZ o danej długości fali.



Rys. 8.25 Zestawienie zbiorcze histogramów widm intensywności dla różnych wartości napięć. Po lewej: $I > 500$. Po prawej: $I > 2000$.

Na podstawie otrzymanych histogramów dla wartości intensywności przekraczających 1000 określono długości fal świetlnych pojawiających się w zarejestrowanych sygnałach, które zestawiono w tabelicy 8.3.

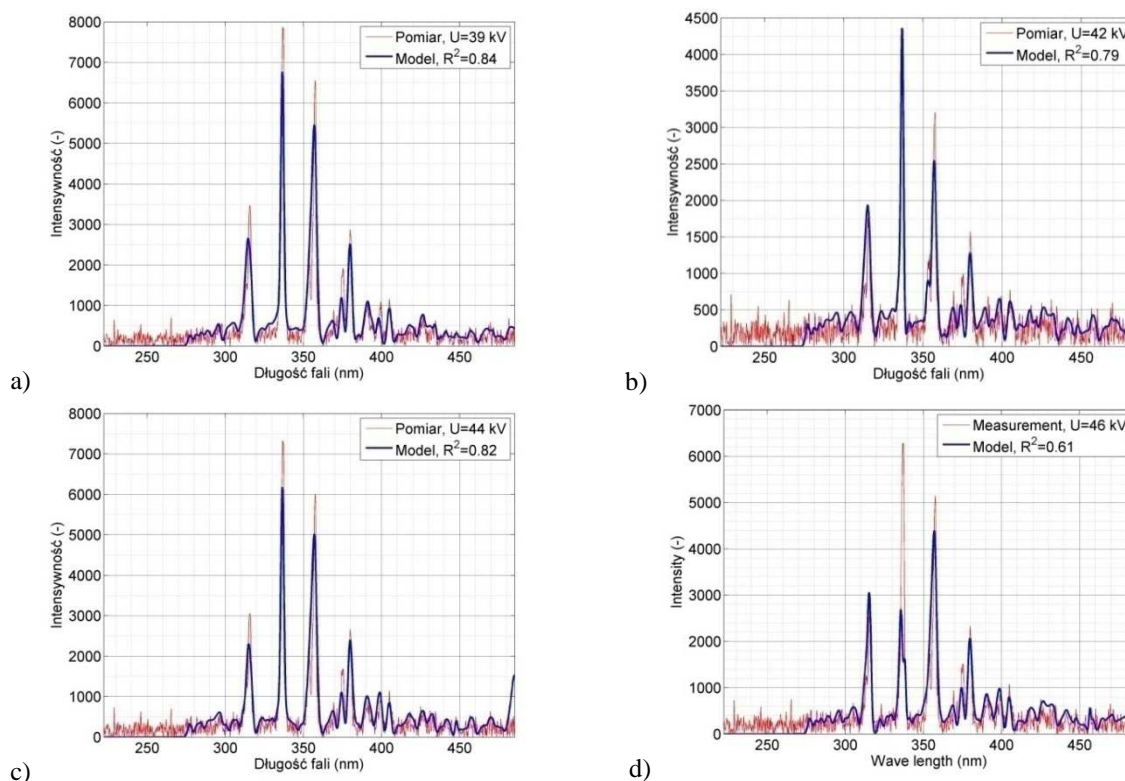
Tablica 8.3

Długości fal występujących w emisji świetlnej wykazującej wartość $I > 2000$.

Przedział długości fal [nm]	Wartości i przedziały długości fal występujące w emisji świetlnej wykazujące wartość intensywności $I > 1000$ [nm]
$\lambda = [200 - 299]$	-
$\lambda = [300 - 399]$	315-317, 335-338, 353-358, 379-381
$\lambda = [400 - 499]$	-
$\lambda > 500$	724

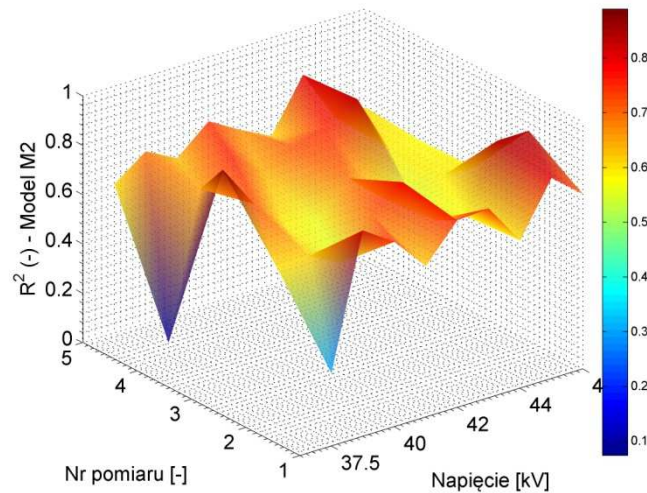
8.4.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa

Na rys. 8.26 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem szeregu Gaussa (wzór 4.16 - model M2) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik pomiarów, kolorem niebieskim - wynik modelowania. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



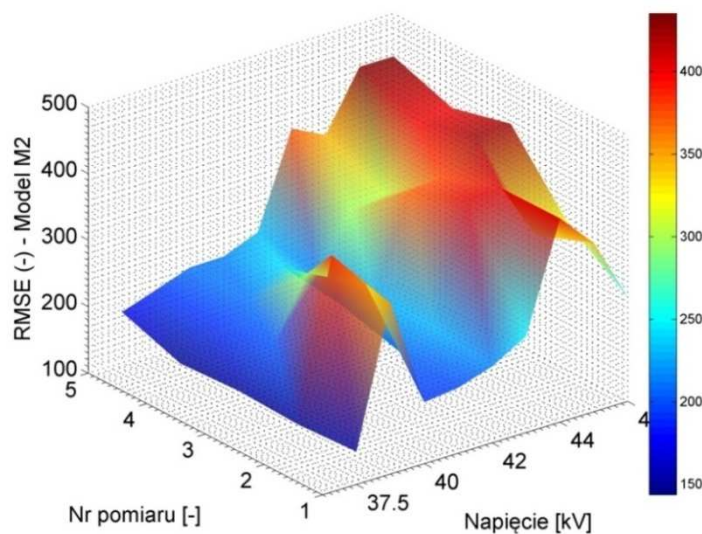
Rys. 8.26 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,81 U_p = 39$ kV, b) $0,87 U_p = 42$ kV, c) $0,91 U_p = 44$ kV, d) $0,95 U_p = 46$ kV.

Na rys. 8.27-8.29 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem szeregu Gaussa (model M2), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.

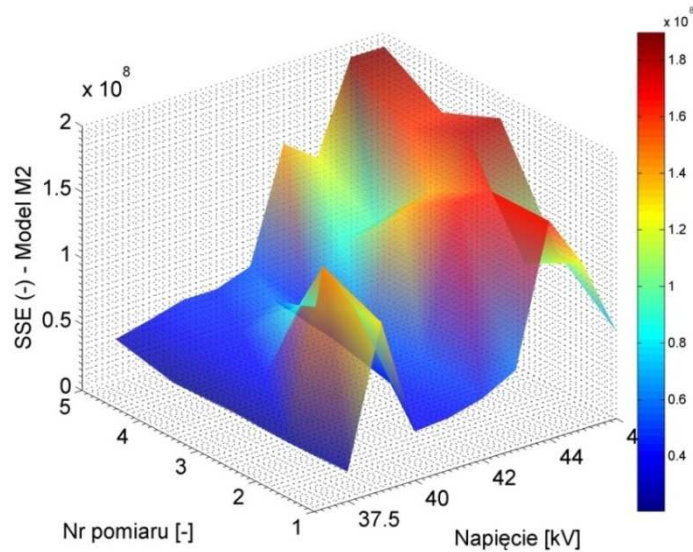


Rys. 8.27 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M2 w przeważającej większości przypadków uzyskuje dobre i bardzo dobre dopasowanie, o czym świadczą wartości powyżej 0,7. Jedynie dla najmniejszych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach.

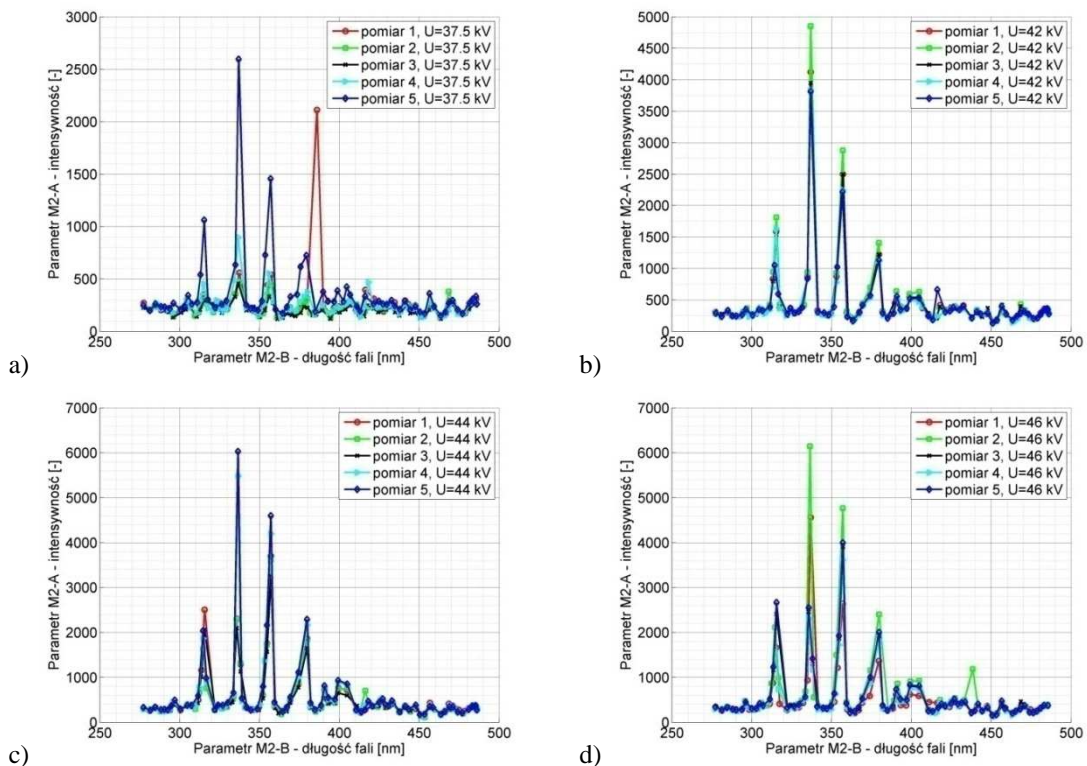


Rys. 8.28 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

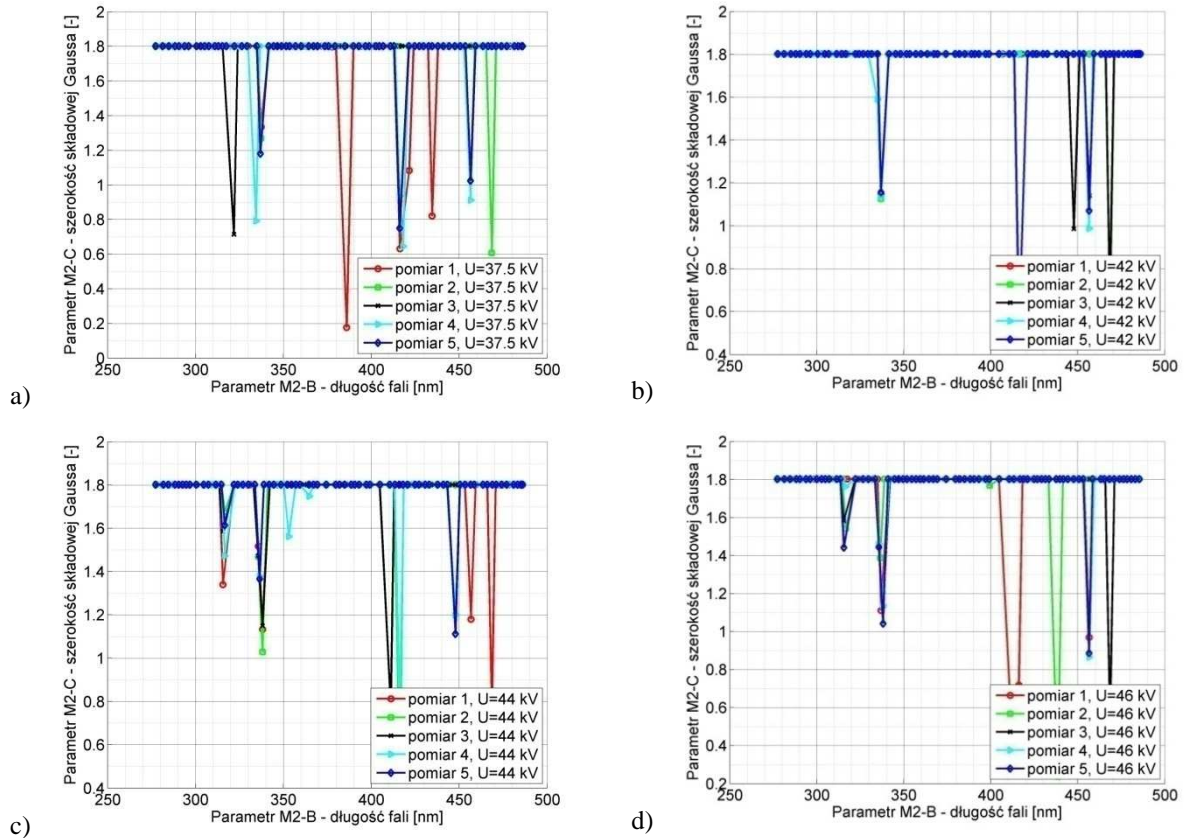


Rys. 8.29 Zestawienie wartości współczynnika *SSE* uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynników *RMSE* i *SSE*, które osiągają wartości powyżej 100 stwierdzono brak możliwości zastosowania tego modelu do celów predykcyjnych. Na rys. 8.30-8.31 przedstawiono wartości parametrów A względem B i parametrów C względem B, uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ.



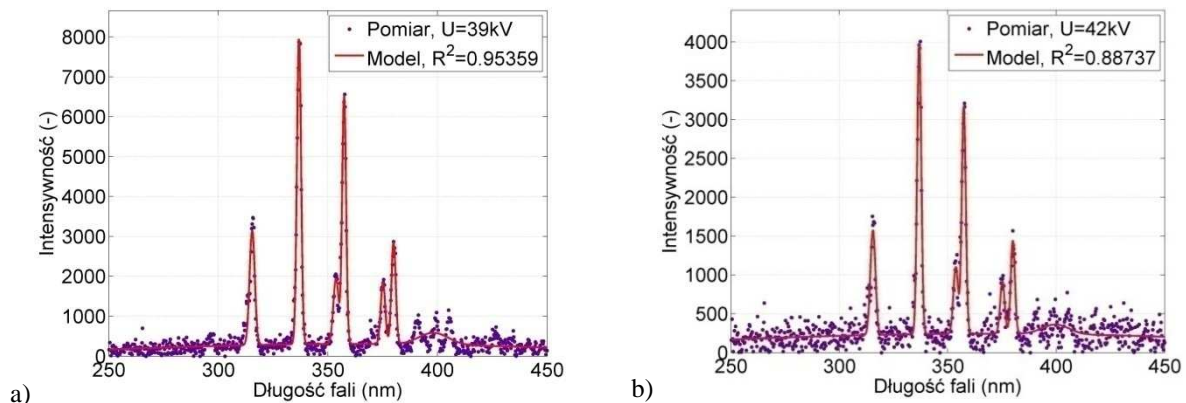
Rys. 8.30 Wartości parametrów A względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,81 U_p = 39$ kV, b) $0,87 U_p = 42$ kV, c) $0,91 U_p = 44$ kV, d) $0,95 U_p = 46$ kV.

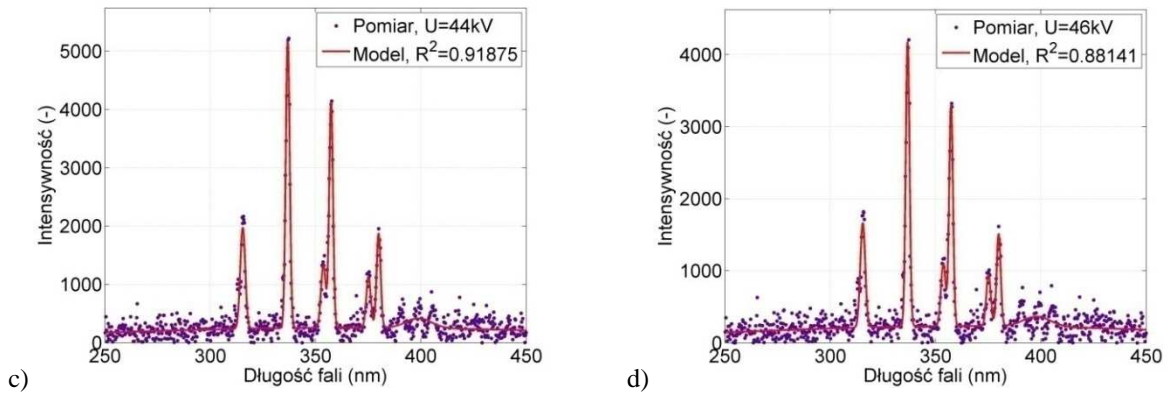


Rys. 8.31 Wartości parametrów C względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,78 U_p = 37,5$ kV, b) $0,87 U_p = 42$ kV, c) $0,91 U_p = 44$ kV, d) $0,95 U_p = 46$ kV.

8.4.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa

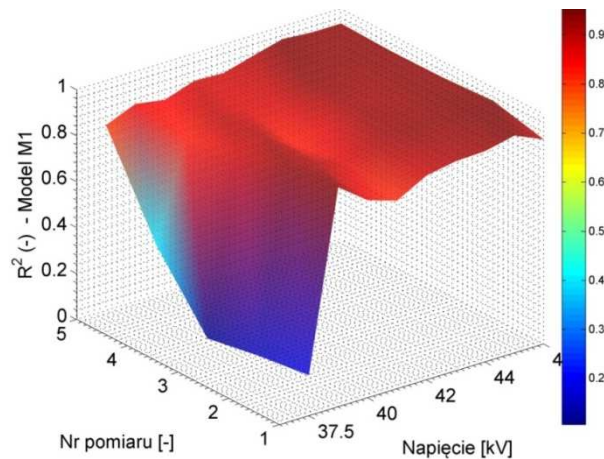
Na rys. 8.32 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (wzór 4.17 - model M1) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik modelowania, kolorem fioletowym - wynik pomiarów. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



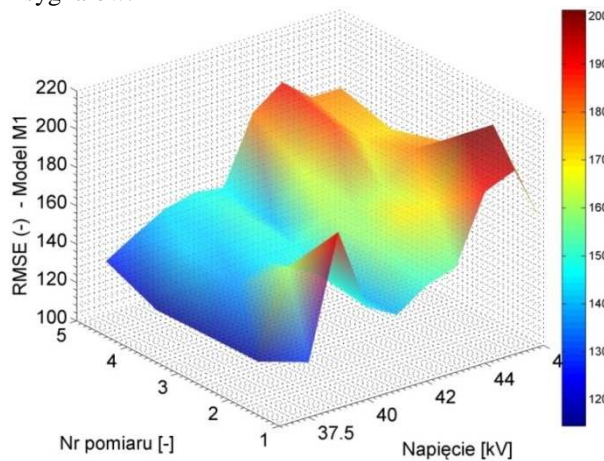


Rys. 8.32 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,81 U_p = 39$ kV, b) $0,87 U_p = 42$ kV, c) $0,91 U_p = 44$ kV, d) $0,95 U_p = 46$ kV.

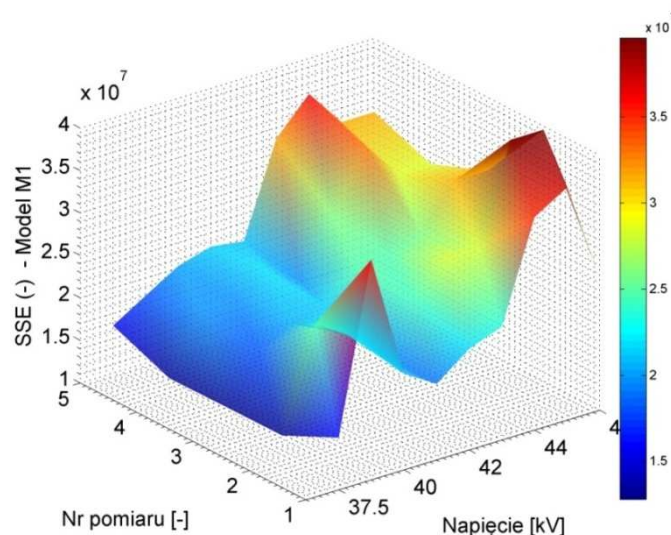
Na rys. 8.33-8.35 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (model M1), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.



Rys. 8.33 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

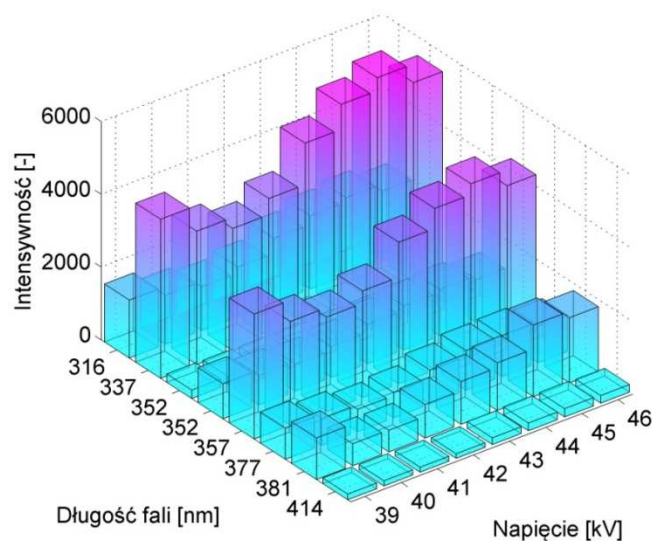


Rys. 8.34 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



Rys. 8.35 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M1 w przeważającej większości przypadków uzyskuje bardzo dobre dopasowanie, o czym świadczą wartości bliskie jedności. Tylko dla najmniejszych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach. Zastosowanie modelu M1 pozwoliło na dokładne określenie intensywności i długości najbardziej dominujących fal świetlnych w rejestrowanym widmie emitowanym przez WNZ. Na rys. 8.36 przedstawiono intensywności poszczególnych długości fal w zależności od wartości napięcia zasilającego badany układ.



Rys. 8.36 Zależność intensywności poszczególnych składowych widma, uzyskanego w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M1, w funkcji napięcia generacji WNZ.

8.5. Zestawienia porównawcze i najważniejsze konkluzje interpretacyjne wyników uzyskanych z przeprowadzonych analiz danych zarejestrowanych metodą optyczną z wykorzystaniem spektrofotometru optycznego

Wykonanie badań spektrofotometrem umożliwiło precyzyjne określenie długości prążków i korespondujących intensywności w rejterowanych sygnałach optycznych. Na podstawie uzyskanych zależności intensywności widma emisyjnego emitowanego przez WNZ generowane na badanych dielektryków i układów izolacyjnych stwierdzono:

- Podczas generacji WNZ na powierzchni porcelanowego izolatora walcowego wypełnionego kwarcem, największe intensywności, sięgające 10000, uzyskano dla długości prążków w zakresach 333-340 i 351-360 nm, przy zasilaniu układu napięciami o wartościach w zakresie od 16,5 kV do 19 kV, podczas gdy odległość między elektrodami wynosiła 3 cm.
- Podczas generacji WNZ na powierzchni porcelanowego izolatora walcowego wypełnionego kwarcem, największe intensywności, sięgające 10000, uzyskano dla długości prążków w zakresach 331-341 i 349-362 nm przy zasilaniu układu napięciami o wartościach w zakresie od 25,5 kV do 27 kV, podczas gdy odległość między elektrodami wynosiła 5 cm.
- Podczas generacji WNZ na powierzchni porcelanowego izolatora walcowego wypełnionego kwarcem, największe intensywności, sięgające 6000, uzyskano dla długości prążków w zakresach 335-339 i 352-359 nm przy zasilaniu układu napięciami o wartościach w zakresie od 31,5 kV do 33,5 kV, podczas gdy odległość między elektrodami wynosiła 7 cm.
- Podczas generacji WNZ na powierzchni porcelanowego izolatora walcowego wypełnionego kwarcem, największe intensywności, sięgające 2000, uzyskano dla długości prążków w zakresach 336-338, 354 i 356-359 nm przy zasilaniu układu napięciami o wartościach w zakresie od 39 kV do 41 kV i od 43 kV do 46 kV, podczas gdy odległość między elektrodami wynosiła 9 cm.
- Podczas generacji WNZ na powierzchni porcelanowego izolatora walcowego wypełnionego kwarcem, największe intensywności, sięgające 2000, uzyskano dla długości prążków w zakresach 335-339, 353-359 nm przy zasilaniu układu napięciami

o wartościach w zakresie od 44 kV do 45 kV i dla ok. 50 kV. Odległość między elektrodami wynosiła 11 cm.

- Analizując wpływ odległości na uzyskiwane wyniki można stwierdzić, że zakres składowych zmniejsza się wraz z rosnącą odległością, co wynika prawdopodobnie ze zjawiska tłumienia poszczególnych prążków w powietrzu.
- W trakcie generacji WNZ na izolatorze kołpakowym wykonanym z porcelany, największe intensywności, przekraczające wartość 9000, uzyskano dla długości prążków w zakresach 333-339 i 352-371 nm. Izolator zasilano napięciami o wartościach w zakresie od 72 kV do 76 kV.
- W trakcie generacji WNZ na wydzielonej części porcelanowego izolatora długopniowego, największe intensywności, przekraczające wartość 6000, uzyskano dla długości prążków w zakresach 335-338 i 353-358 nm. Izolator zasilano napięciami o wartościach w zakresie od 42,5 kV do 46 kV.

W tabelicy 8.4 zestawiono wartości napięć początkowych WNZ U_0 i U_{01} , podczas których urządzenie pomiarowe rejestruje pierwsze fale emisji świetlnej (U_0) lub gdy rejestrowane widma zawierają najwięcej składowych o podwyższonych intensywnościach (U_{01}), w zależności od rodzaju badanego układu. Analiza wartości przedstawionych w tabelicy 8.4 pozwala na stwierdzenie, że zastosowanie spektrofotometru umożliwia wcześniejsze rozpoznanie zjawisk optycznych towarzyszących generacji WNZ.

Tablica 8.4

Zestawienie porównawcze napięć początkowych WNZ dla badanych układów izolacyjnych, podczas których widma emisyjne mają podwyższoną intensywność i najszerszy zakres.

Wartości napięcia początkowego U_0 i U_{01} dla badanych układów izolacyjnych							
-	WPK 3 cm	WPK 5 cm	WPK 7 cm	WPK 9 cm	WPK 11 cm	LK -	LS -
U_0	9,9 kV	18,2 kV	23,6 kV	24,3 kV	25,7 kV	23,3 kV	12 kV
U_{01}	15,5 kV	25,5 kV	30,5 kV	37 kV	39 kV	72 kV	37,5 kV

Na podstawie uzyskanych wyników opracowano tablicę 8.5, w której zestawiono długości dominujących fal zawartych w emisji świetlnej o intensywnościach przekraczających wartość 1000, uzyskane dla poszczególnych dielektryków i izolatorów ceramicznych.

Tablica 8.5

Zestawienie porównawcze długości dominujących fal występujących w emisji świetlnej wykazujące wartości $I > 1000$, dla wszystkich badanych dielektryków i izolatorów ceramicznych.

Symbol układu	Wartości i przedziały długości rejestrowanych fal optycznych λ [nm] wykazujące wartość intensywności $I > 1000$			
WPK 3	203, 296-298	311-318, 333-340, 351-360, 369-382, 390-396, 397-399	400-401, 404-407, 420, 425-428, 434-435	745, 933, 1073
WPK 5	203, 295-299	309-318, 328-329, 331-341, 349-362, 366-383, 386, 388-399	400-407, 414, 416, 418-421, 424-428, 431-435, 449, 456-458	607, 653-654, 658-663, 667-671, 676-678, 724, 745, 774, 793, 913, 933, 1062, 1073
WPK 7	203	306-317, 335-339, 352-359, 374-382, 386, 393-394, 399	400, 405-406, 423	587-594, 640, 672, 745, 766-768, 770-771, 793, 933
WPK 9	203	315-317, 336-338, 354, 356-359, 375-376, 379-381	-	660, 724, 813, 933
WPK 11	-	313-317, 335-339, 353-359, 374-377, 379-382, 399	400, 406	660, 724, 739
LS	-	315-317, 335-338, 353-358, 379-381	-	724
LK	243	312-317, 329, 333-339, 352-371, 373-382, 398-399	400, 404-406, 435, 460	724, 933

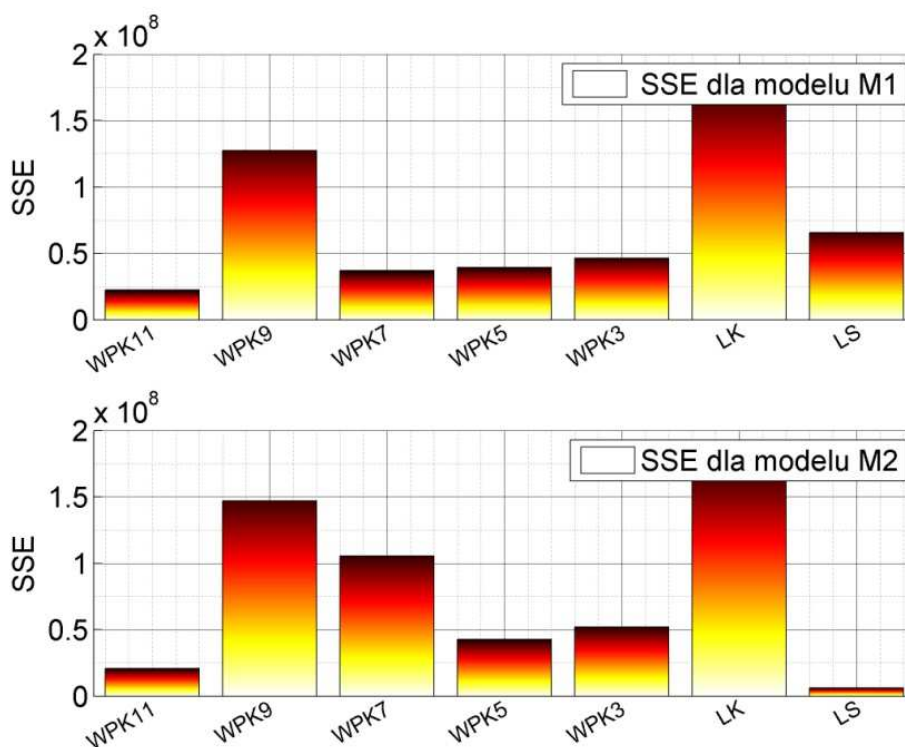
Porównanie danych przedstawionych w tablicy 8.5 pozwala na sformułowanie następujących wniosków ogólnych:

- WNZ emitują fale elektromagnetyczne w zakresie 300-400 nm, niezależnie od dielektryka lub układu izolacyjnego w jakim są generowane.
- Dla porcelanowego walca wypełnionego kwarcem, poza przypadkiem, gdy elektrodę WN umieszczono przy odległości między elektrodami 11 cm, na izolatorach walcowych podczas WNZ emitowane są fale o długości 203 nm.
- WNZ występujące na powierzchni przebadanego izolatora kołpakowego charakteryzują się występowaniem fali o długości 243 nm.
- WNZ występujące na porcelanowym izolatorze walcowym z elektrodą WN umieszczoną przy odległościach między elektrodami 3 cm i 5 cm emitują fale o długościach w zakresie 295-299 nm.
- WNZ emitują wiele fal o długościach z zakresu 400-500 nm podczas występowania na porcelanowym izolatorze walcowym z elektrodą WN umieszczoną przy odległościach między elektrodami 3 cm i 5 cm. Pojedyncze fale w tym zakresie emitowane są na

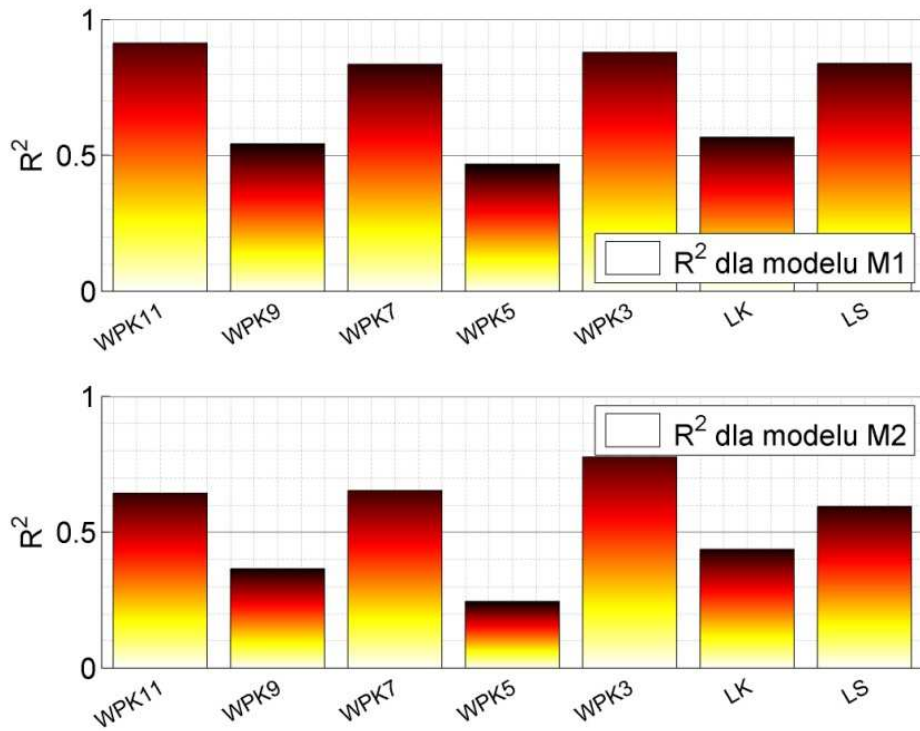
izolatorze kołpakowym ceramicznym i pozostałych rodzajach walców izolacyjnych, z wyjątkiem walca ceramicznego, badanego przy odległości między elektrodami 9 cm. WNZ występujące na porcelanowym izolatorze długopniowym nie emitowały fal optycznych w tym zakresie.

- Fale elektromagnetyczne w zakresie światła widzialnego, powyżej 500 nm, występowały w widmach w sposób zróżnicowany. Najwięcej składowych z tego zakresu zarejestrowano na izolatorach walcowych porcelanowych podczas generacji WNZ przy odległościach 5 cm i 7 cm.
- Najmniej składowych widmowych generują WNZ występujące w izolatorze długopniowym wykonanym z porcelany.

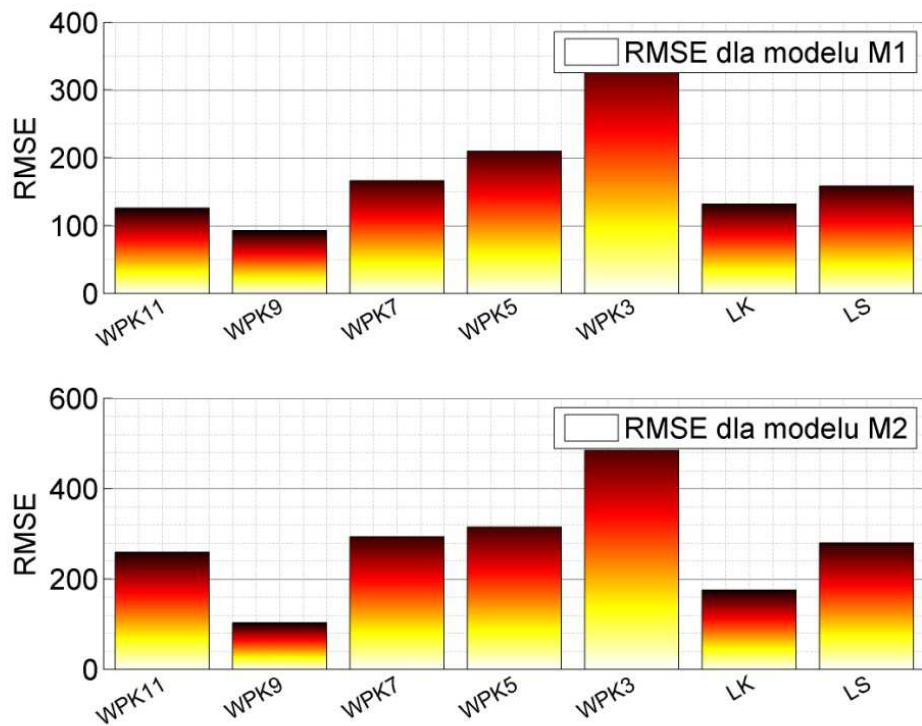
Na rys. 8.37 - 8.39 przedstawiono zestawienia porównawcze obrazujące uśrednione wartości współczynników dopasowania modeli regresyjnych M1 (wzór 4.17) i M2 (wzór 4.16) do danych empirycznych: SSE (wzór 4.10), R^2 (wzór 4.12) i RMSE (wzór 4.11).



Rys. 8.37 Zestawienie porównawcze uśrednionych wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modeli M1 i M2 dla wszystkich badanych dielektryków i układów izolacyjnych.



Rys. 8.38 Zestawienie porównawcze uśrednionych wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modeli M1 i M2 dla wszystkich badanych dielektryków i układów izolacyjnych.



Rys. 8.39 Zestawienie porównawcze uśrednionych wartości współczynnika RMSE uzyskanych w procesie regresji modeli M1 i M2 dla wszystkich badanych dielektryków i układów izolacyjnych.

Analiza porównawcza parametrów dopasowania modeli M1 i M2, opisujących zależność intensywności widm emisyjnych w funkcji długości fali, uzasadnia następujące stwierdzenia:

- Wartości współczynników SSE i RMSE są podobne dla obu modeli. Przebadane układy izolacyjne wykazywały duże wartości tych parametrów, co świadczy o tym, że modele nie są optymalne do zastosowań predykcyjnych.
- Porównując wartości współczynnika determinacji R^2 uzyskane dla modelu M1, można stwierdzić dobre dopasowanie tylko dla wybranych układów izolacyjnych, w tym dla porcelanowego izolatora walcowego przy odległości 3, 7 i 11 cm i dla izolatora typu LS. Pozostałe wartości wskazują na średnie i słabe dopasowanie. W przypadku modelu M2, wszystkie wartości współczynnika dopasowania uzyskały wartości R^2 poniżej 0,7, z wyjątkiem układu WPK3, co również wskazuje na słabe dopasowanie modelu do danych empirycznych.

Należy podkreślić, że powyższa analiza dotyczy wartości uśrednionych "podwójnie", tj. najpierw uśredniono wartości z pięciu pomiarów, a następnie wartości dla wszystkich napięć generacji WNZ. Stąd wydaje się bardziej uzasadnione rozpatrywanie wyników uzyskanych dla wartości uśrednionych "pojedynczo" dla poszczególnych napięć.

9. Podsumowanie

W ramach niniejszej rozprawy wykonano szereg pomiarów, w których przebadano różne układy izolacyjne zbudowane z materiałów ceramicznych, w tym: izolator kołpakowy, wypełniony powietrzem izolator walcowy, wypełniony dielektrykiem kwarcowym porcelanowy izolator walcowy i porcelanowy izolator długopniowy.

Podczas badań przebadano wpływ napięcia generacji WNZ na intensywność WNZ występujących na powierzchni badanych układów izolacyjnych. Określono napięcia początkowe i napięcie przebicia każdego z układów. Dla porcelanowych izolatorów walcowych wypełnionych powietrzem i kwarcem przebadano wpływ odległości między elektrodami na intensywność WNZ.

Wszystkie pomiary wykonano dwoma przyrządami, za pomocą których rejestrowano promieniowanie optyczne w zakresie ultrafioletu i widzialnym, emitowane przez WNZ. Zastosowano kamerę UV i spektrofotometr optyczny. Szczegółowe wnioski dotyczące wyników przeprowadzonych analiz zawarto w rozdz. 7.6 i 8.5.

Uzyskane dane pomiarowe poddano analizom statystycznym w celu określenia różnic i podobieństw między badanymi układami izolacyjnymi oraz w celu określenia wpływu wartości napięcia generacji WNZ na uzyskiwane wyniki pomiarów widm emisyjnych. Wybrane charakterystyki poddano procesowi regresji matematycznej. Zastosowanie regresji matematycznej i określenie parametrów modelu opisującego zależność liczby lub intensywności WNZ od napięcia zasilającego dany układ stanowi nowy rodzaj interpretacji mający na celu opis zjawiska WNZ. Z drugiej strony matematyczny opis takiej zależności pozwala na zastosowanie go w procesie budowy modeli komputerowych. Obecnie podejmowane są próby opisu badanego zjawiska za pomocą modelu tzw. "białej skrzynki". Są to modele komputerowe, w których uwzględnia się zadane parametry wejściowe i wyjściowe, natomiast, samo zjawisko opisywane jest w postaci znanych z teorii równań różniczkowych cząstkowych. Parametrami wejściowymi są m.in. warunki metrologiczne, parametry fizyko-chemiczne materiału izolacyjnego i środowiska w jakim się on znajduje. Przyjmując model typu "biała skrzynka" możliwe jest zastosowanie metod numerycznych, np. Metody Elementów Skończonych, do określenia rozwiązania, tj. określenia wartości parametrów wyjściowych w zależności od zadanych wartości parametrów wejściowych. Parametry takich modeli są dopasowywane (dostrajane), aż otrzymany wynik weryfikacji uzyska zadawalającą wartość.

Innym stosowanym obecnie podejściem są tzw. komputerowe modele typu "czarna skrzynka". W takich modelach nie jest znany teoretyczny (matematyczny) opis badanego zjawiska fizyko-chemicznego. W takich modelach zakłada się liniowość lub nieliniowość procesu, podaje się zestawy wartości parametrów wejściowych i wyjściowych, które uzyskane są na podstawie pomiarów eksperymentalnych. Istnieje szereg dostępnych algorytmów i sposobów określenia przybliżonego (aproksymowanego) rozwiązania dla modeli typu "czarna skrzynka", np. modele Hammersteina-Wienera.

Zarówno w modelach z istniejącym opisem teoretycznym, jak i przy założeniu, że taki opis nie istnieje, pożądane jest aby zależności parametrów wyjściowych od wejściowych opisane były w sposób matematyczny, który można łatwo zaimplementować w postaci programu komputerowego. Dlatego wykonane w rozprawie zadania dotyczące analizy regresyjnej dobrze wpisują się w całość badań prowadzonych w Instytucie Elektroenergetyki i Technologii Odnawialnych i mają istotny wkład w rozwój metod diagnostycznych układów izolacyjnych.

Uzyskane w trakcie realizacji rozprawy wyniki wykonanych pomiarów i modelowania matematycznego potwierdzają tezę, sformułowaną w rozdziale 2.

Oryginalnymi wynikami uzyskanymi przez Autora, przedstawionymi w rozprawie są:

- opracowanie metodologii pomiarowej w tym dobór metod pomiarowych, określenie zakresu wykonanych pomiarów i dobór układów izolacyjnych,
- wykonanie pomiarów intensywności promieniowania optycznego emitowanego przez WNZ występującego w wybranych dielektrykach i układach izolacyjnych, przy zastosowaniu dwóch niezależnych technik pomiarowych, tj.:
 - przy zastosowaniu spektrofotometru, rejestracja w paśmie od 190 nm do 1100 nm,
 - przy użyciu kamery UV, rejestracja w zakresie od 250 nm do 280 nm,
- wykonanie analiz numerycznych uzyskanych wyników i ich interpretacji,
- wykonanie oceny wartości napięcia początkowego wyładowań elektrycznych w oparciu o uzyskane widma emisyjne,
- ocena wpływu wartości napięcia generacji WNZ i odległości między elektrodami na uzyskiwane wyniki rejestracji intensywności promieniowania optycznego,
- wykonanie analizy regresyjnej i zastosowanie funkcji aproksymujących w celu opisu uzyskanych zależności,
- wykonanie analizy porównawczej intensywności promieniowania optycznego emitowanego przez WNZ występujące na badanych dielektrykach i układach izolacyjnych,
- w oparciu o wyniki przeprowadzonych analiz dokonanie wyboru pasma użytecznych długości emitowanych fal, w którym zarejestrowano największą intensywność promieniowania optycznego generowanego przez emitowane WNZ.

Na podstawie wyników analizy widm optycznych potwierdzono, że WNZ występujące na powierzchniach przebadanych układów izolacyjnych emitują sygnały optyczne o charakterystycznych długościach fal, które wyróżniają się zwiększoną intensywnością. Wyznaczenie wartości napięcia początkowego WNZ w oparciu o widma emisyjne zarejestrowane metodą optyczną pozwala na bardziej precyzyjną diagnozę badanego układu izolacyjnego. Otrzymane w rozprawie wyniki pomiarów i analiz można uogólnić na całą populację układów izolacyjnych wykonanych z porcelany, co daje możliwość zastosowania metody optycznej do diagnostyki i określenia stanu technicznego tego typu układów.

Rezultaty otrzymane w ramach realizacji rozprawy mogą zostać wykorzystane w przyszłości do prowadzenia prac związanych z rozpoznawaniem WNZ występujących w układach izolacyjnych wykonanych z innego typu materiałów dielektrycznych.

Kolejnym możliwym kierunkiem badań jest wykorzystanie otrzymanych rezultatów do prowadzenia prac związanych z budową systemu diagnostycznego, którego celem byłaby ocena stanu technicznego układów izolacyjnych pracujących w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, uwzględniających dodatkowe czynniki takie jak np.: promieniowanie słoneczne, poziom wilgotności i temperatura.

LITERATURA

- [1] **AHMAD M.H., PIAH M.A.M., ARIEF Y.Z., BASHIR N., CHALASHKANOV N., DODD S.J.:** Temperature Dependence of PD from Electrical Trees Grown in Silicone Rubber based Nanocomposites, IEEE Int. Conf on Solid Dielectrics, Bologna, Italy, 2013, pp. 816-819.
- [2] **Al. MARZOUQI H.:** The Density Based Segmentation Algorithm for Interpreting Partial Discharges Data, Int. Conf. on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, 2010, pp. 1-3.
- [3] **ARBUZOV R., OVSYANNIKOV A.:** Electron optical control of the external insulation condition. Current state and possibilities, Proc. of the 8-th Int. Scientific and Practical Conference of Students, Post graduates and Young Scientists, Modern Techniques and Technologies, 2002, pp. 28-30.
- [4] **ARDILA-REY J. A., ROJAS-MORENO M.V., MARTINEZ-TARIFA J.M., ROBLES G.:** Inductive Sensor Performance in Partial Discharges and Noise Separation by Means of Spectral Power Ratios, Sensors Vol. 14, 2014, pp. 3408-3427
- [5] **ARUMUGAM S., SCHRÖDER, F. NEUBAUER Y., SCHOENEMANN T.:** Dielectric and Partial Discharge Investigations on Ceramic Insulator Contaminated with Condensable Hydrocarbons, IEEE Tr Trans. on DEI, Vol. 21, No. 6, 2014, pp. 2512-2524.
- [6] **BADENT R., KIST K., SCHWAB A., WURSTER M.:** Light emission measurements of pre-discharges in insulation oil, IEEE Annual Report Conf. on EI and Dielectric Phenomena, Atlanta, USA, Vol. 2, 2008, pp.452-455.
- [7] **BARTNIKAS R.:** Partial discharges, their mechanism, detection and measurement, IEEE Trans. on DEI, Vol. 9, No. 5, 2002, pp. 763-808.
- [8] **BERNATJ., GIELNIAK J., MORAÑDA H.:** Zjawiska wyładowań na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach kompozytowych, Przegląd Elektrotechniczny, R. 84, nr 10, 2008, str. 1-4.
- [9] **BIAN X., WANG L., GUAN Z., CAO J., YANG Y., WU X.:** Experimental investigation on altitude correction factor of positive DC corona inception voltage of transmission lines based on the mobile corona cage, IEEE Int. Conf. on HV Engineering and Application, New Orleans, USA, 2010, pp. 548-551.
- [10] **BOCZAR T., BORUCKI S., CICHON A., ZMARZLY D.:** Application possibilities of artificial neural networks for recognizing partial discharges measured by the acoustic emission method, IEEE Trans. on DEI, Vol. 16, No. 34, 2009, pp. 214-223.
- [11] **BOCZAR T., CICHON A., BORUCKI S.:** Diagnostic expert system of transformer insulation systems using the acoustic emission method, IEEE Trans. on DEI, Vol. 21, No. 2, 2014, pp. 854 - 865.
- [12] **BOCZAR T., FRĄCZ P., ZMARZLY D.:** Analiza widma optycznego generowanego przez wyładowania elektryczne w oleju izolacyjnym, Konf. n-t, Transformatory w Eksploatacji, Sieniawa, 2003, str. 187-194.
- [13] **BOCZAR T., FRĄCZ P., ZMARZLY D.:** Analysis of the Light Radiation Spectra Emitted by Electrical Discharges in Insulation Oil, Physics and Chemistry of Solid State, No 4, Vol. 4, Iwano-Frankivsk, Ukraina, 2003, pp. 58-67.
- [14] **BOCZAR T., FRĄCZ P., ZMARZLY D.:** Optical Spectra of Electrical Discharges Generated in Insulation Oil, III Int. Symp. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, NEET, Zakopane, 2003, pp. 37-39.
- [15] **BOCZAR T., FRĄCZ P., ZMARZLY D.:** Widma optyczne wyładowań elektrycznych”, Zeszyt Specjalny Przeglądu Elektrotechnicznego, VII Ogólnopolskie Symp. Inżynieria Wysokich Napięć IW, Poznań, 2004, str. 19-22.

- [16] **BOCZAR T., FRĄCZ P.:** Application Possibilities of the Optical Spectrophotometry Method in Insulation System Diagnostics of Power Appliances, Proc. 35 th Int. Conf., Defektoscopy, Znojmo, Czech Republic, 2005, pp. 25-32.
- [17] **BOCZAR T., FRĄCZ P.:** Comparative Analysis of Optical and Acoustic Emission Signals Generated by Partial Discharges”, IV Int. Conf. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, NEET, Zakopane, 2005, pp. 227-229.
- [18] **BOCZAR T., FRĄCZ P.:** Comparison of the measurement results of electrical discharges registered by the acoustic emission and optical spectrophotometry methods, Physics and Chemistry of Solid State, Vol. 7, No 3, Iwano-Frankivsk, Ukraina, 2006, pp. 564-571.
- [19] **BOCZAR T., ZMARZŁY D., FRĄCZ P.:** Możliwości zastosowania spektrofotometrii optycznej w diagnostyce układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 10, 2007, str. 36-41.
- [20] **BOCZAR T., ZMARZŁY D.:** Application of Wavelet Analysis to Acoustic Emission Pulses Generated by Partial Discharges, IEEE Trans. on DEI, Vol. 11, No. 3, 2004, pp. 433-449.
- [21] **BROCKSCHMIDT M., POHLMANN F., KEMPEN S., GRÖPPEL P.:** Testing of Nano-Insulation Materials Some Ideas, Some Experiences, IEEE Conf. on Electrical Insulation, Annapolis, Maryland, 2011, pp.506-510.
- [22] **BRUNT R.V.:** Stochastic properties of partial discharge phenomena, IEEE Trans. on EI, Vol. 26, No. 5, 1991, pp. 902-948.
- [23] **CAO Y., IRWIN P.C., YOUNSI K.:** The Future of Nanodielectrics in the Electrical Power Industry, IEEE Trans. on DEI, Vol. 11, No. 5, 2004, pp. 797-807.
- [24] **CARBAJAL-DE LA TORRE G., ESPINOSA-MEDINA M.A., MARTINEZ-VILLAFANE A., GONZALEZ-RODRIGUEZ J.G., CASTAÑO V.M.:** Study of Ceramic and Hybrid Coatings Produced by the Sol-Gel Method for Corrosion Protection, The Open Corrosion Journal, Vol. 2, 2009, pp. 197-203.
- [25] **CAVALLINI A., MONTANARI G.C.:** Diagnostic of HVDC Systems Using Partial Discharges, IEEE Trans. on DEI, Vol. 18, No. 1, 2011, pp. 275-284.
- [26] **CELŃSKI Z.:** Materiałoznawstwo elektrotechniczne. Politechnika Warszawska 1998.
- [27] **CHAPMAN M., BRUETSCH R.:** Suppression of Partial Discharges in High-Voltage Rotating Machines, IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, Canada, 2009, pp. 338-342.
- [28] **CHAPRA S., CANALE R.:** Numerical Methods for Engineers, McGraw-Hill, 2009
- [29] **CHEN T., HE W., LIU X., XIONG D.:** An on-line ultraviolet detecting system of EHV transmission lines, Automation of Electric Power Systems, Vol. 7, 2005, pp. 88-92.
- [30] **CHEN Z., WANG P., YU B.:** Research of UV detection system based on embedded computer, IEEE World Automation Congress, 2008, pp. 1-4.
- [31] **CHENG Y., LI C., HUANG X.:** Study of corona discharge pattern on high voltage transmission lines for inspecting faulty porcelain insulators, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, 2008, pp. 945-952.
- [32] **CHRISTEN T.:** HVDC Insulation Boundary Conditions for Modeling and Simulation, IEEE Trans. on DEI, Vol. 22 No. 1, 2015, pp. 35-44.
- [33] **CHRZAN K. L., WIATRZYK M., NAITO K.:** Izolatory kołpakowe ze szkliwem półprzewodzącym. VI Konf. Postępy w Elektrotechnologii, Jamrozowa Polana 2000, str. 81-87.
- [34] **CIOK Z., MAKSYMIOK J., POCHANKE Z., ZDANOWICZ L.:** Badania urządzeń energetycznych. WNT, Warszawa, 1992.

- [35] **COLES S.:** An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer-Verlag, 2001.
- [36] **DAVE V., GUPTA H.O., CHANDRA R.:** Investigation of Hydrophobic and Optical properties of HfO₂ coating on ceramic insulator, IEEE 10th Int. Conf. on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 2012, pp. 1-4.
- [37] **DENAT A., BONIFACI N.:** Spectroscopic investigation of electrical discharge in liquids, Proc. of 14th Int. Conf. on Dielectric Liquids, 2002, pp. 285-288.
- [38] **ELBORKI M.A., CROSSLEY P.A., WANG Z.D., DARWIN A., EDWARDS G.:** Detection and characterization of partial discharges in transformer defect models, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002, pp. 405-410.
- [39] **FARD M.A., AKBARI A., SHOJAEI R., MIRZAEI H.R., NADERI P.:** Partial discharge defects classification using neuro-fuzzy inference system, 10th IEEE Inf. Conf. on Solid Dielectrics (ICSD), Potsdam, Germany, 2010, pp. 1-4.
- [40] **FLESZYŃSKI J., LISIECKI J., POHL Z.:** Miernictwo wysokonapięciowe i laboratorium wysokich napięć, Wyd. Pol. Wr., 1990.
- [41] **FLESZYŃSKI J., LISOWSKI M., ADAMOWSKA M., LACHOWSKI A.:** Badania wpływu narażeń starzeniowych na właściwości izolacyjne elastomerów silikonowych stosowanych na osłony w izolatorach kompozytowych, Prace Naukowe Inst. Elektrotechniki i Elektrotechnologii Pol. Wr., Nr 37, seria: konf. Nr 12, 2000.
- [42] **FLESZYŃSKI J., TYMAŃ A.:** Elektroenergetyczne izolatory kompozytowe: aktualne problemy badawcze, Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Pol. Wr., Nr 34, seria: Konferencje Nr 10, 1998, str. 205-208.
- [43] **FLESZYŃSKI J.:** Praca zbiorowa: Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [44] **FLISOWSKI Z.:** Technika wysokich napięć. Wyd. V zm., WNT Warszawa, 2009.
- [45] **FLORKOWSKA B., FLORKOWSKI M., WŁODEK R., ZYDRON P.:** Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia. IPPT-PAN, Warszawa, 2001.
- [46] **FLORKOWSKA B., FLORKOWSKI M., ZYDRON P.:** Frequency analysis of corona based disturbances in high voltage overhead: International Carpathian Conference on EMC : protection of computer systems against electromagnetic disturbances, Rzeszów, 2002, pp. 2-6.
- [47] **FLORKOWSKA B., ROEHRICH J., ZYDRON P., FOLORKOWSKI M.:** Partial discharge characteristics of enameled wire of electric machine winding under exploitation stresses, IEEE Int. Conf. on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, 2010, pp. 1-4.
- [48] **FLORKOWSKA B., ZYDRON P.:** Analiza widmowa ulotu elektrycznego, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10 s, 2002, str. 80-84.
- [49] **FLORKOWSKA B.:** Podstawy metod badań układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Wydawnictwo AGH, Kraków 1991.
- [50] **FLORKOWSKA B.:** Technika wysokich napięć. Wydawnictwo AGH, Kraków 1991.
- [51] **FRĄCZ P., ZMARZŁY D.:** Diagnostyka linii wysokiego napięcia przy użyciu pomiarów spektrometrycznych, Of. Wyd. Pol. Op., Opole, 2010, Studia i Monografie, nr 278, pod. red. J. Sadeckiego, str. 111-116.
- [52] **FRĄCZ P.:** Analiza możliwości wykorzystania kamery do pomiaru promieniowania ultrafioletowego emitowanego przez wyładowania niezupełne generowane na modelu izolatora przepustowego, PAK, Vol.57, Nr 4, 2011, str. 387-390.

- [53] **FRĄCZ P.:** Analiza powtarzalności pomiarów sygnałów optycznych emitowanych przez wyładowania elektryczne w izolacji powietrznej, *Przegląd Elektrotechniczny*. Nr 7, 2010, str. 128-130.
- [54] **FRĄCZ P.:** Analysis of measurement repeatability of optical signals emitted by electrical discharges in air insulation, *Proc. of 6th Int. Symp. New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation, NEET 2009, Zakopane*, pp. 44-48.
- [55] **FRĄCZ P.:** Badanie promieniowania ultrafioletowego generowanego przez wyładowania niezupełne powierzchniowe w powietrzu, *Pomiary Automatyka Robotyka*, Nr 12, 2010, str. 90-92.
- [56] **FRĄCZ P.:** Influence Estimation of the Voltage Value on the Measurement Results for the Optical Radiation Generated by Partial Discharges on Bushing Isolator, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 120, 2011, pp. 604-608.
- [57] **FRĄCZ P.:** Measurement of optical signals emitted by surface discharges on bushing and post insulator, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 20, No 5, 2013, pp. 1909-1914.
- [58] **FRĄCZ P.:** Ocena wpływu zmian wartości napięcia na wyniki pomiarów promieniowania optycznego generowanego przez wyładowania niezupełne powierzchniowe na modelu izolatora wsporczeo, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 57, Nr 4, 2011, str. 383-386.
- [59] **FRĄCZ P.:** Założenia systemu eksperckiego pomiaru wyładowań niezupełnych przy zastosowaniu metody spektrofotometrii optycznej, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 55, Nr 1, 2009, str. 50-53
- [60] **FRĄCZ P.:** Wykorzystanie optycznych sygnałów emitowanych przez wyładowania elektryczne w diagnostyce izolatorów. *Studia i Monografie*, nr 285, Of. Wyd. Pol. Op., Opole, 2011.
- [61] **GACEK Z.:** Kształtowanie wysokonapięciowych układów izolacyjnych stosowanych w elektroenergetyce, *Wyd. Pol. Śl., Gliwice*, 2002.
- [62] **GACEK Z.:** Wysokonapięciowa technika izolacyjna. *Wyd. Pol. Śl., Gliwice* 1996.
- [63] **GALLIMBERTI I., HEPWORTH J., KLEWE R.:** Spectroscopic investigation of impulse corona discharges, *Journal of Physics D:Applied Physics*, Vol. 7, 1974, pp. 880-899.
- [64] **GAO Y., DU B.X. ZHANG J.W.:** Measurement of Surface Resistivity on Gamma-Ray Irradiated Polymer Insulating Materials, *Conf. Proc. of ISEIM*, 2011, pp. 11-164.
- [65] **GIAO T., JORDAN J.:** Modes of corona discharges in air, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-87, No. 5, 1968, pp. 1207-1215.
- [66] **GIRIANTARI I.:** Monitoring the insulator condition by on-line voltage distribution measurement, *IEEE Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 2008, pp. 392-394.
- [67] **GORUR R., CHERNEY E., BURNHAM J.:** *Outdoor Insulators*, Ravi S Gorur, Inc, 1999.
- [68] **GUASTAVINO F., TORELLO E., SQUARCIA S., DARDANO A., SECCI M., FERRARO F., PISTONE D.:** Morphologic Analysis and Diagnosis of Defects Inside Cast Resin Medium Voltage Current Transformers Insulation by Digital Partial Discharges Acquisitions, *Annual Report Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2011, pp. 493-496.
- [69] **GUBANSKI S.M., DERNFALK A., ANDERSSON J., HILLBORG H.:** Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators, *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 14, No. 5, 2007, pp. 1065 - 1080.
- [70] **GULSKY E.:** Digital Analysis of Partial Discharges, *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 2 No. 5, 1995, pp. 822-837.
- [71] **HE W., CHEN T., X. LIU, YANG F., YAO D., XIONG D.:** On-line monitoring system of faulty insulator based on non-touching UV pulse method, *Automation of Electric Power Systems*, Vol. 10, 2006, pp. 69-74.

- [72] **HU J, SUN C., JIANG X., ZHANG Z., SHU L.:** Flashover Performance of Pre-contaminated and Ice-covered Composite Insulators to be Used in 1000 kV UHV AC Transmission Lines, IEEE Trans. on DEI, Vol. 14, No. 6, 2007, pp. 1347-1356
- [73] **HUGH R.:** High voltage engineering and testing (2nd Edition), 2001 Institution of Engineering and Technology.
- [74] **ILLIAS H. A., TUNIO M. A., MOKHLIS H.:** Determination of Partial Discharge Time Lag in Void using Physical Model Approach, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 1, 2015, pp. 463-471.
- [75] **IZZATI W.A., ARIEF Y.Z.:** Effect of Particle Size and Filler Type in Polymeric Material Insulations, IEEE Student Conf. on Research and Development, 2012. pp. 28-31.
- [76] **JACOB N.D., MCDERMID W.M., KORDI B.:** On-line Monitoring of Partial Discharges in a HVDC Station Environment, IEEE Trans. on DEI, Vol. 19, No. 3; June 2012, pp. 925-935.
- [77] **JAMES R., SU Q.:** Condition assessment of high voltage insulation in power systems equipment, 2008 Institution of Engineering and Technology.
- [78] **JIANG T., WANG J., HE W., YANG F.:** Non-contact on-line insulators monitoring based on UV-pulse detecting, IEEE Proc. of Automation Congress, 2008, pp.1-3.
- [79] **KARMAKAR S., ROY, N.K., KUMBHAKAR P.:** Detection of partial discharges in a high voltage equipment, Journal of Electrical Engineering, Vol. 9, 2009, pp. 26-31.
- [80] **KAUFHOLD M., BAMJI S., BULINSKI A.:** Optical detection of partial discharges in gas-insulated systems, Annual Report Conf. on EI and Dielectric Phenomena, Millbrae, USA, 1996, pp. 618-622.
- [81] **KEMP I.:** Partial discharge plant-monitoring technology: present and future developments, IEE Proc. Science, Measurement and Technology, Vol. 142, 1995, pp. 4-10.
- [82] **KOJIMA H., HAYAKAWA N., ENDO F., OKUBO H.:** Novel measurement and analysis system for investigation of partial discharge mechanism in SF6 Gas, 12th IEEE Int. Meddle East Power System Conf., Aswan, Egipt, 2008, pp. 75-79.
- [83] **KOLBIŃSKI K., SŁOWIKOWSKI J.:** Materiałoznawstwo elektrotechniczne, WNT Warszawa, 1988
- [84] **KULJACA N., MEREGALLI S., CONTIN A., UKOVICH A.:** Separation of Multiple Sources in PD Measurements Using an Amplitude-Frequency Relation Diagram, Int. Conf. on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, 2010, pp. 1-4.
- [85] **LAGARIAS J.C., REEDS J.A., WRIGHT M.H., WRIGHT P.E.:** Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, SIAM Journal of Optimization, Vol. 9, No 1, 1998, pp. 112-147.
- [86] **LI E.:** The study of the characteristics of corona discharge, High Voltage Apparatus, Vol. 6, 1998, pp. 16-21.
- [87] **LI Z., OKAMOTO K., OHKI Y., TANAKA T.:** Role of Nano-Filler on Partial Discharge Resistance and Dielectric Breakdown Strength of Micro-Al2O3 / Epoxy Composites, Proc. of the 9th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China, 2009, pp. 753-756.
- [88] **LIDMANOWSKI W.:** Zarys teorii wyładowań w dielektrykach. WNT, Warszawa 1988.
- [89] **LIMIN Y., ZHANGYU Y.:** Ultraviolet image processing method in corona detection, IEEE Second Int. Workshop on Computer Science and Engineering, 2009, Vol. 1, pp. 327-331.
- [90] **LINDELL E., BENGTTSSON T., BLENNOW J., GUBANSKI S.M.:** Evaluation of a PD measuring system for repetitive steep voltage waveforms, IEEE Trans. on DEI, Vol. 18, No. 1, 2011, pp. 246-255.

- [91] **LINDNER M., ELSTEIN S., LINDNER, P. TOPAZ J., PHILLIPS A.:** Daylight corona discharge imager, 11th Int. Symp. on HV Engineering, Vol. 4, 1999, pp. 349-352.
- [92] **LIU Y., DU B.X.:** Energy eigenvector analysis of surface discharges for evaluating the performance of polymer insulator in presence of water droplets, IEEE Trans. on DEI, Vol. 21, No. 6, 2014, pp. 2438 - 2447.
- [93] **LOOMS J.S.T.:** Insulators for high voltages. Peter Peregrinus Ltd. London, 1990.
- [94] **LU F., WANG S., LI H.:** Insulator pollution grade evaluation based on ultraviolet imaging and fuzzy logic inference, IEEE Conf. on Power and Energy Engineering, Chengdu, China, 2010, pp. 1-4.
- [95] **LU J., MOON K.S., KIMT B.K., WONG C.P.:** Novel All Organic High Dielectric Constant Polyaniline/epoxy Composites for Embedded Capacitor Applications, 11th Int. Symp. on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interface, 2006, pp. 88-92.
- [96] **MA B., ZHOU W., WANG T., DING Y.:** Study on corona discharge test under power frequency voltage of the severe non-uniform electric field based on the UV-light imaging technology, IEEE 4th Asia-Pacific Conf. on Environmental Electromagnetics, Dalian, China, 2006, pp. 253-259.
- [97] **MARUVADA P.:** Corona performance of high-voltage transmission lines, 2000, Taylor and Francis Group.
- [98] **MAYOUX C.:** Corona discharge and ageing process of an insulation, IEEE Trans. on EI, Vol. EI-12, No. 2, 1977, pp. 153-158.
- [99] **MCPHEE K. H.:** An Introduction to Inorganic Dielectrics, IRE Transactions on Component Parts, Vol. 6, no. 1, 1959, pp. 3-33.
- [100] **MENG X., CAO W.:** New method to detect insulation on line – ultraviolet image method, High Voltage Engineering, Vol. 6, No. 32, 2006, pp. 42-44.
- [101] **MENGUY C., GUERIN P., FALLOU B., FORTUNE D.:** Partial discharge energy measurements on insulation systems and equipments, Conf. Record of the IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, Boston, USA, 1988, pp. 258-261.
- [102] **MONTANARI G.C., MORSHUIS P., CERVI A.:** Monitoring HV transformer conditions: The strength of combining various diagnostic property observations, IEEE Int. Conf. on Advances in Communication and Computing Technologies (ICACACT), Mumbai, India, 2014, pp. 141 - 144.
- [103] **MOORE P., HICKERY D., URBANEJA M.:** Remote sensing of voltage using optical assessment of corona, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, 2000, pp. 1159-1164.
- [104] **MORSHUIS P., GULSKI E.:** Diagnostic tools for condition monitoring of insulating materials, IEEE Annual Report Conf. on EI and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, USA, 1995, pp. 327-330.
- [105] **MORTENSEN T., BUNGANAEN Y., SCELSE G., WOOLSEY G.:** Gaseous and solids by-products of SF6 discharges, Proc. of the 4th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, 1994, pp. 135-138.
- [106] **MOŚCICKA-GRZESIAK H.** Praca zbiorowa: Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce. Tom 1 i 2. 1999, 2000.
- [107] **MOSIŃSKI F.:** Metody statystyczne w technice wysokich napięć, Pol. Łódźka 1991.
- [108] **MOSIŃSKI F.:** Podstawy techniki wysokich napięć. Politechnika Łódźka 1994.
- [109] **MUHR M., SCHWARZ R., JAUFER S.:** Electrical measurement as diagnostic tool for HV-insulations, Höfler's Days, 2005.
- [110] **MUHR M., SCHWARZ R.:** Experience with optical partial discharge detection, Materials Science-Poland, Vol. 27, No. 4/2, 2009, pp. 1139-1146.

- [111] **MUHR M., SCHWARZ R.:** Partial discharge impulse characteristics of different detection systems, Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, 2006, pp. 158-161.
- [112] **MUHR M., SCHWARZ R.:** Partial discharge measurement as diagnostic tool for HV- equipments, 8th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2006, pp. 195-198.
- [113] **NAIDU M., KAMARAJU V.:** High voltage engineering (2nd Edition), 1996 McGraw-Hill.
- [114] **OKUBO H.:** Enhancement of Electrical Insulation Performance in Power Equipment Based on Dielectric Material Techniques, Annual Report Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2011, pp. 1-19.
- [115] **OLIVEIRA S., FONTANA E.:** Optical detection of partial discharges on insulator strings of high-voltage transmission lines, IEEE Trans. in Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No7, 2009, pp. 2328-2334.
- [116] **OTHMAN N.A., PIAH M.A.M., ADZIS Z., AHMAD H.:** Measurement of surface charge distribution on glass insulator using steel mesh, IEEE Int. Conf on Power and Energy (PECon), 2014, pp. 105-108.
- [117] **PIVA R. H. VILARINHO P., MORELLI M.R, FIORI M.A., MONTEDO O.R.K.:** Influence of Fe₂O₃ content on the dielectric behavior of aluminous porcelain insulators, Ceramics International, Vol. 39, 2013, pp. 7323-7330.
- [118] **POHL Z.:** Izolatory elektroenergetyczne, Of. Wyd. Pol. Wr., Wrocław, Wyd. II poprawione, 2000.
- [119] **POYHONEN S., CONTI M., CAVALLINI A., MONTANARI G.C., FILIPPETTI F.:** Insulation Defect Localization through Partial Discharge Measurements and Numerical Classification, IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics, 2004, pp. 417-422.
- [120] **PREETHA P., THOMAS M.:** Partial discharge resistant characteristics of epoxy nanocomposites, IEEE Trans. on DEI, Vol. 18, No. 1, 2011, p. 264–274.
- [121] **PULETTI F., OLIVIERI M., CAVALLINI A., MONTANARI G.C.:** Risk Management of HV Polymeric Cables Based on Partial Discharge Assessment, IEEE PES Transmission and Distribution Conf. and Exhib., 2006, pp. 626-633.
- [122] **ROY M., NELSON J.K., MACCRONE R.K., SCHADLER L.S., REED C.W., KEEFE R., ZENGER W.:** Polymer Nanocomposite Dielectrics – The Role of the Interface, IEEE Trans. on DEI, Vol. 12 No. 4, 2005, pp. 629-643.
- [123] **SANTOSH KUMAR A., GUPTA R., UDAYAKUMAR K., VENKATASAMI A.:** Online partial discharge detection and location techniques for condition monitoring of power transformers: a review, IEEE Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008, pp. 927-931.
- [124] **SCHWARZ R., JUDENDORFER T., MUHR M.:** Review of Partial Discharge Monitoring techniques used in High Voltage Equipment, 2008 Annual Report IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008, pp. 400-403.
- [125] **SCHWARZ R., MUHR M., JAUFER S.:** Partial discharge impulse behavior in different insulation media, Conference Record of the IEEE Int. Symp. on EI, Toronto, Kanada, 2006, pp. 306-309.
- [126] **SCHWARZ R., MUHR M., PACK S.:** Evaluation of partial discharge impulses with optical and conventional detection systems, Proc. of the XIVth Int. Symp. on HV Engineering, 2005, pp.1-4.
- [127] **SCHWARZ R., MUHR M., PACK S.:** Partial discharge detection and localization for application in transformers, 13th Int. Symp. on HV Engineering, 2003, pp. 463-464.
- [128] **SCHWARZ R., MUHR M., PACK S.:** Partial discharge detection in oil with optical methods, IEEE Int. Conf. on Dielectric Liquids, 2005, pp. 245-248.

- [129] **SCHWARZ R., MUHR M.:** Modern technologies in optical partial discharge detection, Annual Report IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007, pp. 163-166.
- [130] **SERDYN N., TOIT D.:** Calibration of UV-sensitive camera for corona detection, Praca dyplomowa, Stellenbosch University, RPA, 2007.
- [131] **SHONG K., KIM Y., KIM S.:** Images detection and diagnosis of corona discharge on porcelain insulation at 22.9 kV D/L, IEEE Int. Symp. on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007, pp. 462-466.
- [132] **SIEROTA A., ZDANOWICZ L.:** Optical emission resulting from partial discharges between metal and dielectric in air. IX Symp. on Electrical Discharges in Gases, Kazimierz Dolny, 1985, pp. 9-35.
- [133] **SKUBIS J., FRĄCZ P.:** Prognozy wykorzystania metody optycznej diagnostyki spektralnej do detekcji i pomiaru różnego typu wyładowań elektrycznych. Konf. n-t, Transformatory w Eksploatacji, Sieniawa, 2002, str. 159-164.
- [134] **SKUBIS J.:** Metody diagnostyki układów izolacyjnych transformatorów dużej mocy, II Konf. N-T Technika Wysokonapięciowa, Kazimierz Dolny, 1999, str. 145-162.
- [135] **SKUBIS J.:** Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej, Of. Wyd. Pol Op., Opole, 1998.
- [136] **STOLPER R., HART J., MAHATHO N.:** The design and evaluation of a multi-spectral imaging camera for the inspection of transmission lines and substation equipment, World Insulator Congress and Exhibition, Hong Kong, China, 2005.
- [137] **STONE G.:** Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment, IEEE Trans. on DEI, Vol. 12, No. 5, 2005, pp. 891-903.
- [138] **STONE G.C., KUFFEL J.:** Digital Recording Techniques for Electrical Insulation Measurements, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 5, No. 3, 1989, pp. 9-17.
- [139] **STRZESZEWSKI G.:** Technologia i materiałoznawstwo elektrotechniczne, Wyszaków 2010.
- [140] **SUBOCZ L.:** Ultraviolet radiation effect on certain insulation materials, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 84, Nr 3, 2008, str. 87-88.
- [141] **SZCZEPAŃSKI Z., OKONIEWSKI S.:** Technologia i materiałoznawstwo dla elektroników, WSiP Warszawa, 2012.
- [142] **SZCZEPAŃSKI Z., LECHOWSKI Z.:** Układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych, WNT, Warszawa, 1978.
- [143] **SZCZEPAŃSKI Z.:** WNZ w izolacji urządzeń elektrycznych. Wa-wa, WNT 1973
- [144] **SZPOR S., DZIERŻEK H., WINIARSKI W.:** Technika wysokich napięć. WNT Warszawa 1978.
- [145] **TAN W., HUANG W., WANG K., ZHANG Z.:** The study of ultraviolet pulse for partial discharge of transformers, IEEE World Automation Congress, 2008, pp. 1-4.
- [146] **TANAKA T., KOZAKO M., FUSE N., OHKI Y.:** Proposal of a Multi-core Model for Polymer Nanocomposite Dielectrics., IEEE Trans. on DEI, Vol. 12, No. 4, 2005, pp. 669-681.
- [147] **TANAKA T., MONTANARI G.C, MULHAUPT R.:** Polymer Nanocomposites as Dielectrics and Electrical Insulation-perspectives for Processing Technologies, Material Characterization and Future Applications. IEEE Trans. on DEI, Vol. 11 No. 5, 2004, pp. 763-784.
- [148] **TEHLAR D., RIECHERT U., BEHRMANN G., SCHRAUDOLPH M.:** Test stand for high voltage insulator partial discharge testing with ultra short X-ray pulses, IEEE Int. Conf on Solid Dielectrics, Bologna, Italy, 2013, pp. 71-74.

- [149] **THERIEN C.W.:** Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing, Prentice Hall, 1992
- [150] **TRNKA P., PIHERA J., SVOBODA M., SOUČEK J.:** New challenges in partial discharge measurements, IEEE Int. Conf on Solid Dielectrics, Bologna, Italy, 2013, pp. 75-78.
- [151] **VAILLANCOURTE G., BELLERIVE J., ST-JEAN M., JEAN C.:** New live line tester for porcelain suspension insulators on high-voltage power lines, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, 1994, pp. 208-219.
- [152] **VAILLANCOURTE G., CARIGNAN S., JEAN C.:** Experience with the detection of faulty composite insulators on high-voltage power lines by the electric field measurement method, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, 1998, pp. 661-666.
- [153] **VAN BRUNT R.:** Physics and chemistry of partial discharges and corona – recent advances and future challenges, Annual Report IEEE Conf. on EI and Dielectric Phenomena, 1994, pp. 29-70.
- [154] **VELDHUIZEN E., RUTGERS W.:** Corona discharges: fundamentals and diagnostics, Invited paper, Proc. of the 4th Conf. Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostic, 2001, pp. 40-49.
- [155] **WALPOLE R., MYERS R., YE K.:** Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Pearson Education, 2002
- [156] **WANG W.S., LU F., LI H.:** Non-contact discharge detection system for high voltage equipment based on solar-blind ultraviolet photomultiplier, IEEE Int. Conf. on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010, Vol. 2, pp. 773-776.
- [157] **WAŃKOWICZ J.:** Przeskok zabrudzeniowy. Wybrane zagadnienia eksploatacyjne i materiałowo-konstrukcyjne izolatorów elektroenergetycznych. Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Pol. Wr. , Nr 28, Seria Monografie, Nr 11, Wrocław, 1995.
- [158] **WŁODEK R.:** Aktualny stan i tendencje w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Materiały konferencyjne VII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Wysokiego Napięcia EUI, Zakopana, 1999, str. 9-14.
- [159] **WŁODEK R.:** Mechanizmy działania wyładowań niezupełnych w dielektrykach. PWN, Warszawa, 1992.
- [160] **WODZIŃSKI J.:** Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów. Warszawa, WNT 1997.
- [161] **WU G.:** The study on partial discharges using light detection method, IEEE Int. Symp. on EI, 2000, pp. 332-335.
- [162] **WU K., PAN C., MENG Y., SUN C., GAO M., QIN K., LONG H.:** Study on the characteristics of partial discharges in voids under square voltage by detecting light emission intensity, IEEE Trans. on DEI, Vol. 18, No. 5, 2011, pp. 1651 - 1657.
- [163] **XU N., LATHAM R., GODDARD B., TAN J., TAYLOR B.:** Effects of geometry and polarity on the prebreakdown and flashover behavior of conical high-voltage insulators in vacuum, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 25, No. 3, 1997, pp. 447 - 454.
- [164] **XU Y., YU M., CAO X., QIU C., CHEN G.:** Comparison between optical and electrical methods for partial discharge measurement, Proc. of the 6th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000, pp. 300-303.
- [165] **ZANG C., LEI H., JIANG Z., YE H., HE S., ZHAO X., JIANG Z.:** Study on application of ultra-violet instrument in external insulation detection of electric device, IEEE Int. Conf. on HV Engineering and Application, 2008, pp.391-393.
- [166] **ZANG C., YE H., LEI H., YIN X., YIN J., JUNJIA H., JIANG Z., HE S., ZHAO X.:** Using ultraviolet imaging method to detect the external insulation faults of electric device, Annual Report Conf. on EI and Dielectric Phenomena, 2009, pp. 26-30.

- [167] **ZANG C., ZHAO X., HE S., LEI H., JIANG Z., YE H., JIANG Z.:** Research on mechanism and ultraviolet imaging of corona discharges of electric device faults, IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, 2008, pp.690-693.
- [168] **ZHANG H., PANG Q., CHEN X.:** The characteristics of high-voltage corona and its detection, Electrical Measurement and Instrumentation, Vol. 43, No. 2, 2006, pp. 6-8.
- [169] **ZHANG H., PANG Q., LI H., ZHANG G.:** Detection of high voltage corona based on UV spectrum technology, Acta Photonica Sinica, Vol. 35, No. 8, 2006, pp. 1162-1166.
- [170] **ZHOU W., LI H., YI X., TU J., YU J.:** A criterion for UV detection of AC corona inception in rod-plane air gap, IEEE Trans. on DEI, Vol. 18, No. 1, 2011, pp. 232-237.
- [171] **ZOU C., FOTHERGILL J.C., Rowe S.W.:** The Effect of Water Absorption on the Dielectric Properties of Epoxy Nanocomposites, IEEE Trans. on DEI, Vol. 15, No. 1; 2008, pp. 106-117.

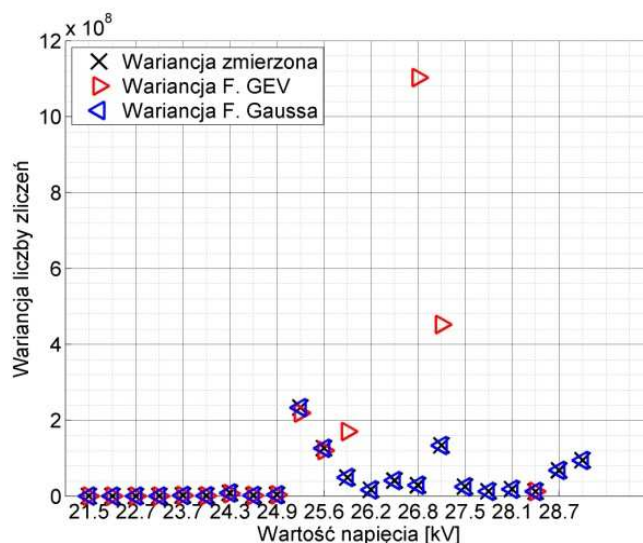
**WYNIKI ANALIZY WIDM EMISYJNYCH WYŁADOWAŃ
WYSTĘPUJĄCYCH NA POWIERZCHNI CERAMICZNEGO WALCA
IZOLACYJNEGO WYPEŁNIONEGO POWIETRZEM**

- 1. Odległość między elektrodami 5 cm**
- 2. Odległość między elektrodami 7 cm**
- 3. Odległość między elektrodami 9 cm**
- 4. Odległość między elektrodami 11 cm**

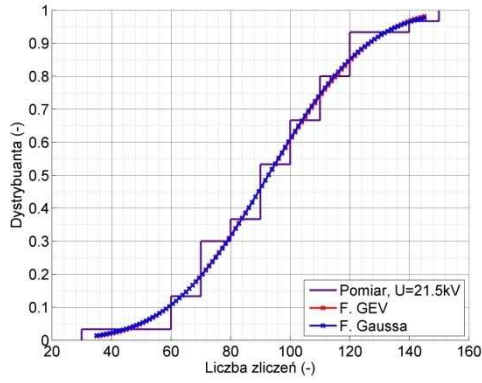
1. Odległość między elektrodami 5 cm

Na rys. 1 przedstawiono zależność liczby punktów emisyjnych (wariancja) emitowanych przez wyładowania generowane w walcu izolacyjnym ceramicznym wypełnionym powietrzem od wielkości podawanego napięcia. Krzyżykiem oznaczono wariancję zmiennej *liczba zliczeń* zarejestrowanych podczas pomiarów. Czerwonym trójkątem oznaczono wariancję uzyskaną z teoretycznego rozkładu obliczonego z wykorzystaniem funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Zaobserwowano wzrost wariancji dla napięć przekraczających 0,79-0,87 w odniesieniu do napięcia przebicia U_p . Zaprezentowane wartości są w większości przypadków wielkości zmierzonych i obliczonych jednakowe. Wyjątek stanowią pojedyncze różnice dla funkcji GEV.

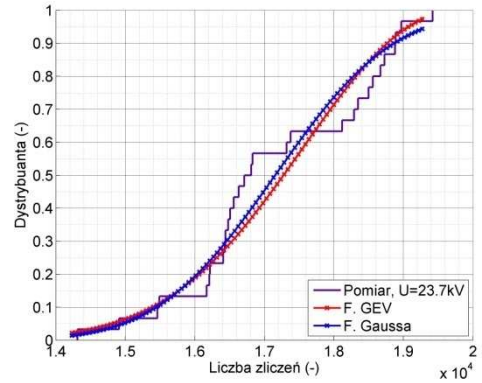
Na rys. 2 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,68 b) 0,75 c) 0,78 d) 0,81 e) 0,87 f) 0,92 [w odniesieniu do U_p]. Na rys. 3 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,68 b) 0,75 c) 0,78 d) 0,81 e) 0,87 f) 0,92 [w odniesieniu do U_p]. Kolorem fioletowym zaznaczono dane dotyczące wyników pomiarów, kolorem czerwonym dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Obliczenie histogramów i określenie teoretycznych rozkładów liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) oraz empirycznych dystrybuant umożliwiło potwierdzenie stochastycznej natury badanego zjawiska. Analiza dystrybuant pozwoliła na określenie najczęściej występujących wartości liczby zliczeń dla poszczególnych napięć generacji WNZ. Rozkłady liczebności pozwoliły na określenie liczby modów rozkładu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że rozkłady najbardziej zbliżone do rozkładu normalnego, tj. rozkłady Gaussa, występują jedynie dla najniższej wartości napięcia generacji WNZ, znacznie częściej charakter rozkładów jest opisywalny funkcją GEV, zwłaszcza w zakresie: 0,77-0,78 i powyżej 0,83 U_p , tj. powyżej 27 kV.



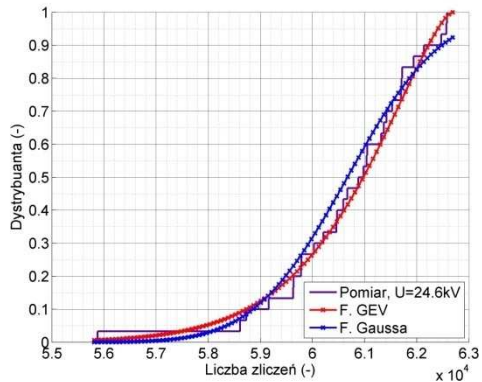
Rys. 1 Zależność wariancji zmiennej *liczba zliczeń* od wielkości podawanego napięcia.



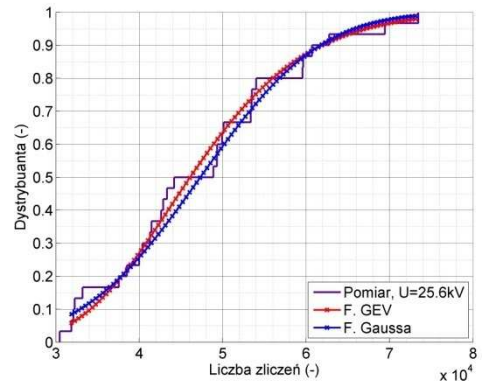
a)



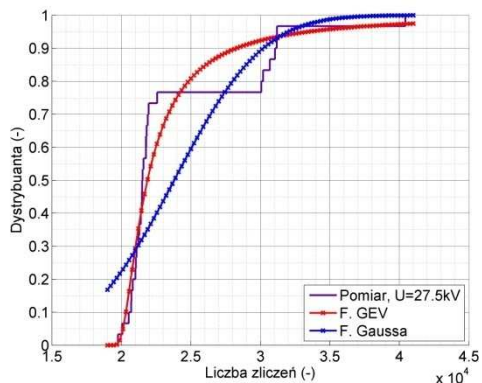
b)



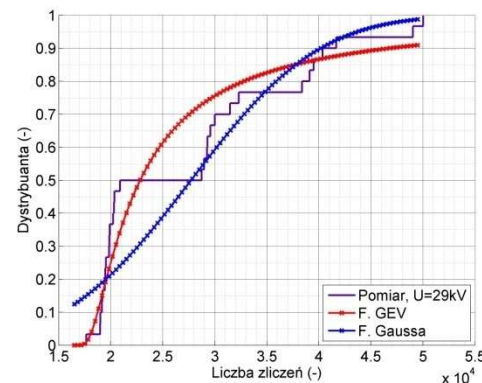
c)



d)

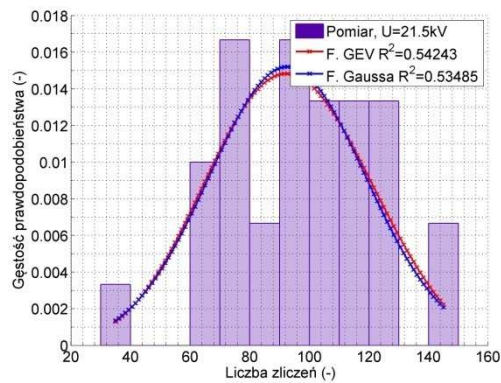


e)

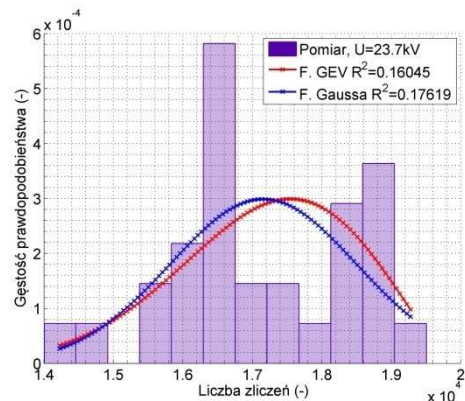


f)

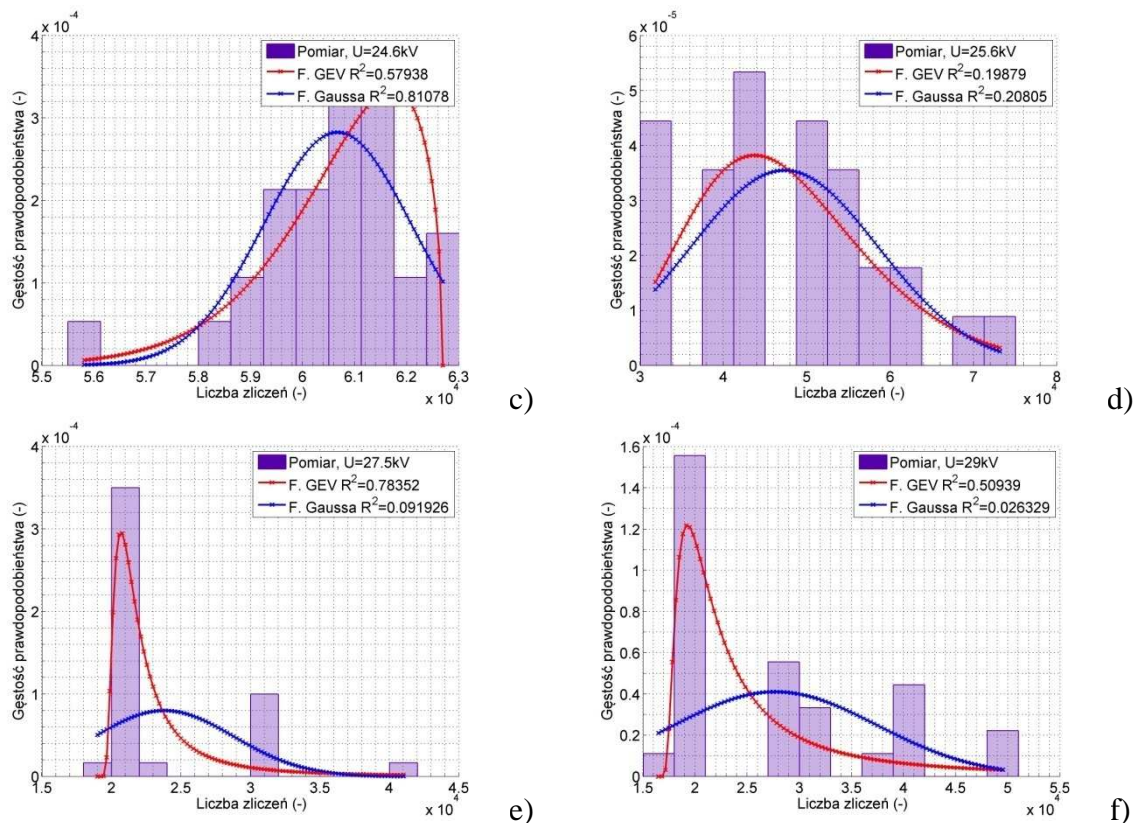
Rys. 2 Dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,68 U_p = 21,5$ kV; b) $0,75 U_p = 23,7$ kV; c) $0,78 U_p = 24,6$ kV; d) $0,81 U_p = 25,6$ kV; e) $0,87 U_p = 27,5$ kV; f) $0,92 U_p = 29$ kV.



a)

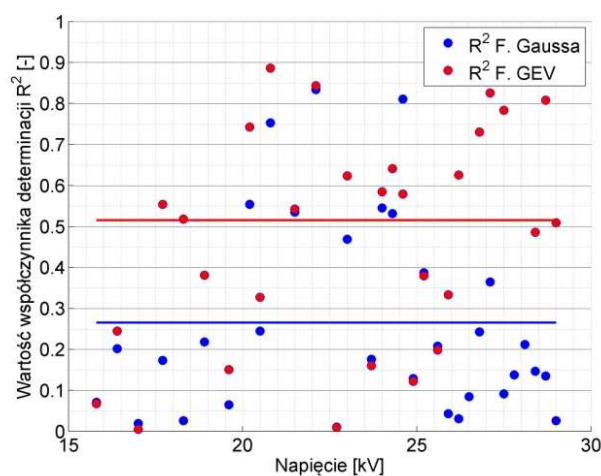


b)



Rys. 3 Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ:
 a) $0,68 U_p = 21,5$ kV; b) $0,75 U_p = 23,7$ kV; c) $0,78 U_p = 24,6$ kV; d) $0,81 U_p = 25,6$ kV;
 e) $0,87 U_p = 27,5$ kV; f) $0,92 U_p = 29$ kV.

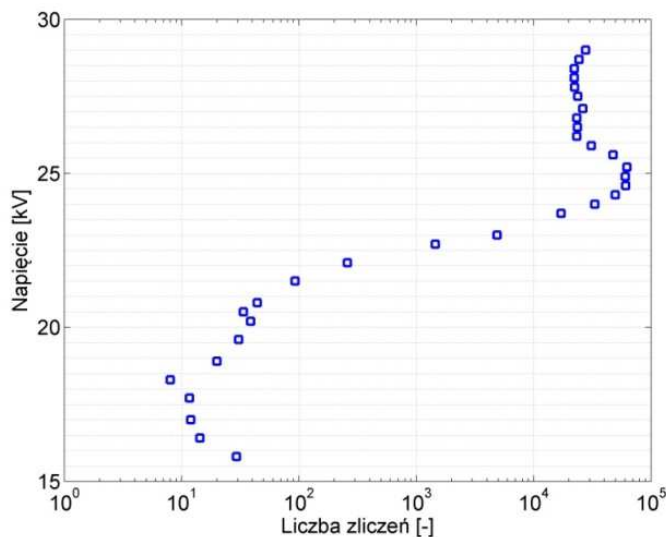
Na rys. 4 przedstawiono wartości współczynników determinacji R^2 obliczonego ze wzoru (4.5). Wartości obliczono dla wszystkich wyznaczonych rozkładów liczebności. Kolorem czerwonym zaznaczono dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - dla funkcji Gaussa. Dodatkowo linią ciągłą wskazano wartości średniej arytmetycznej. Przedstawione na rys. 4 zestawienie umożliwiło podsumowanie wykonanej analizy stochastyczności, która wykazała, że charakter obserwowanej liczby punktów emisyjnych można częściej opisać rozkładem GEV.



Rys. 4 Zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji obliczonych dla obu rozpatrywanych teoretycznych rozkładów liczebności w funkcji napięcia generacji WNZ.

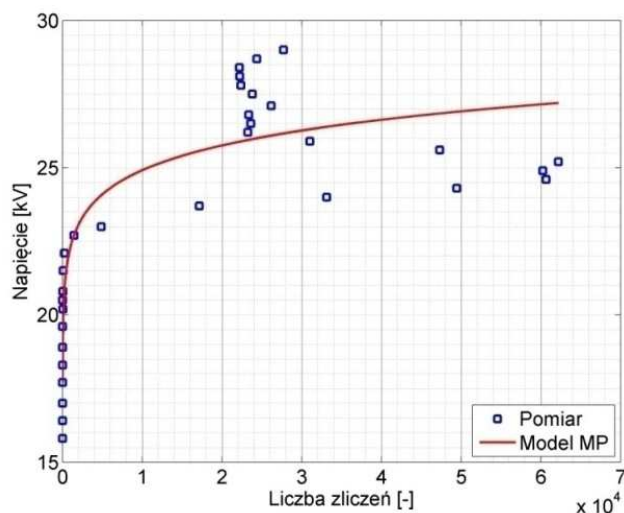
Niskie wartości współczynnika R^2 występują znacznie częściej dla rozkładu Gaussa co wskazuje, że natury badanego fenomenu nie powinno się wyjaśniać takim rozkładem.

Na rys. 5 przedstawiono zależność wielkości napięcia podawanego na walec izolacyjny ceramiczny wypełniony powietrzem od uśrednionej liczby punktów emisyjnych emitowanych przez generowane wyładowania. Oś odciętych przedstawiono w skali logarytmicznej.

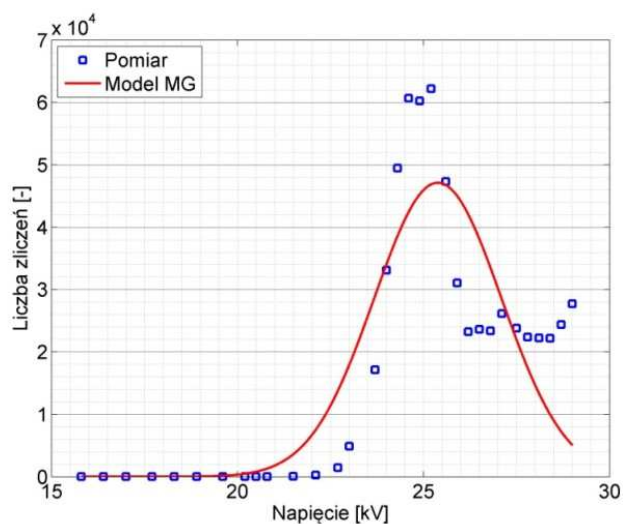


Rys 5 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, wykres logarytmiczny.

Na rys. 6 kolorem niebieskim przedstawiono zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MP. Na rys. 7 kolorem niebieskim przedstawiono zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MG. W tabelicy 1 zestawiono wartości parametrów dopasowania, obliczonych wg wzorów (4.10-13) dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. W tabelicy 2 zestawiono wartości estymowanych parametrów dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników *R-square* i *adj-R-square* stwierdzono nieznacznie lepsze dopasowanie modelu MP względem modelu MG. Natomiast wartości *RMSE* i *SSE*, które są znacząco bardziej zbliżone do zera dla modelu MP wskazują na możliwość zastosowania modelu MP do predykcji liczby punktów emisyjnych w zależności od napięcia generacji WNZ. Ze względu na wysokie wartości parametrów *RMSE* i *SSE* dla modelu MG nie należy zalecać jego stosowania do predykcji.



Rys. 6 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń* oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MP.



Rys. 7 Zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MG.

Tablica 1

Obliczone wartości parametrów dopasowania modeli regresyjnych.

Zestawienie parametrów określających jakość dopasowania modeli do danych empirycznych					
Nazwa	SSE	R-square	dfe	adj-R-square	RMSE
Wartość MG	3370656376	0,729	29	0,711	10780
Wartość MP	93,94	0,803	29	0,789	1,799

Tablica 2

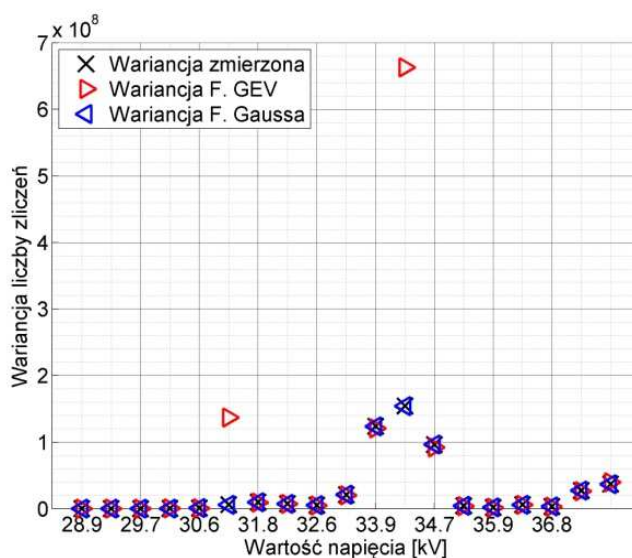
Estymowane wartości parametrów modeli regresyjnych.

Estymowane wartości parametrów modeli			
Nazwa	A	B	C
Wartość MG	47123	25,38	2,42
Wartość MP	16,005	0,048	0,00027

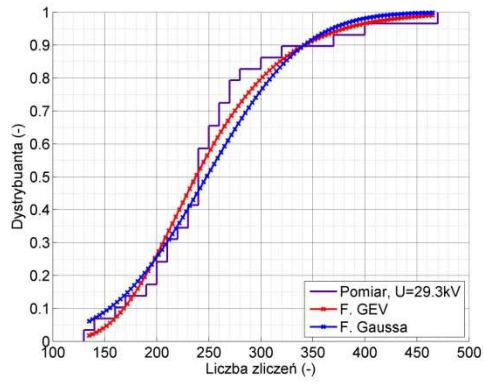
2. Odległość między elektrodami 7 cm

Na rys. 8 przedstawiono zależność liczby punktów emisyjnych (wariancja) emitowanych przez wyładowania generowane w walcu izolacyjnym ceramicznym wypełnionym powietrzem od wielkości podawanego napięcia. Krzyżykiem oznaczono wariancję zmiennej *liczba zliczeń* zarejestrowanych podczas pomiarów. Czerwonym trójkątem oznaczono wariancję uzyskaną z teoretycznego rozkładu obliczonego z wykorzystaniem funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Zaobserwowano wzrost wariancji dla napięć w zakresie 0,82-0,84 w odniesieniu do napięcia przebicia U_p . Zaprezentowane wartości są w większości przypadków wielkości zmierzonych i obliczonych jednakowe. Wyjątek stanowią pojedyncze różnice dla funkcji GEV.

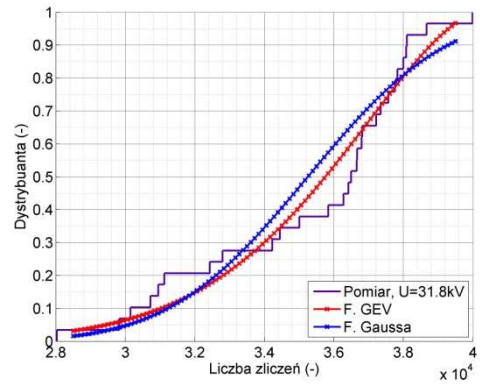
Na rys. 9 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,71 b) 0,77 c) 0,82 d) 0,87 e) 0,89 f) 0,91 [w odniesieniu do U_p]. Na rys. 10 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,71 b) 0,77 c) 0,82 d) 0,87 e) 0,89 f) 0,91 [w odniesieniu do U_p]. Kolorem fioletowym zaznaczono dane dotyczące wyników pomiarów, kolorem czerwonym dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Obliczenie histogramów i określenie teoretycznych rozkładów liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) oraz empirycznych dystrybuant umożliwiło potwierdzenie stochastycznej natury badanego zjawiska. Analiza dystrybuant pozwoliła na określenie najczęściej występujących wartości liczby zliczeń dla poszczególnych napięć generacji WNZ. Rozkłady liczebności pozwoliły na określenie liczby modów rozkładu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że dla większości wyników uzyskuje się słabe lub umiarkowane dopasowanie modeli teoretycznych do danych empirycznych obu badanych rozkładów.



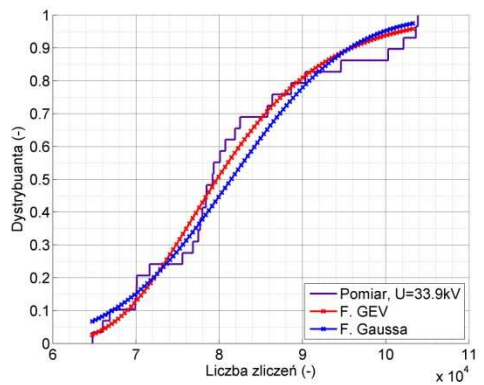
Rys. 8 Zależność wariancji zmiennej *liczba zliczeń* od wielkości podawanego napięcia.



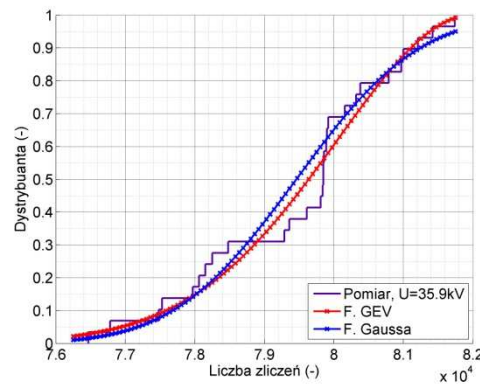
a)



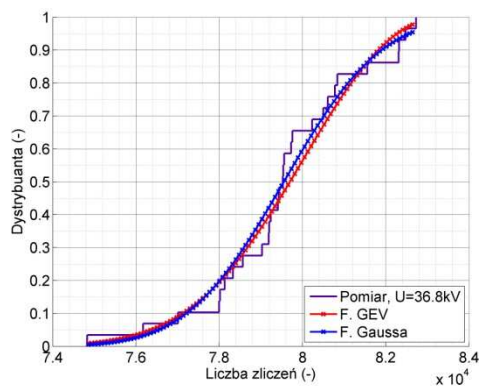
b)



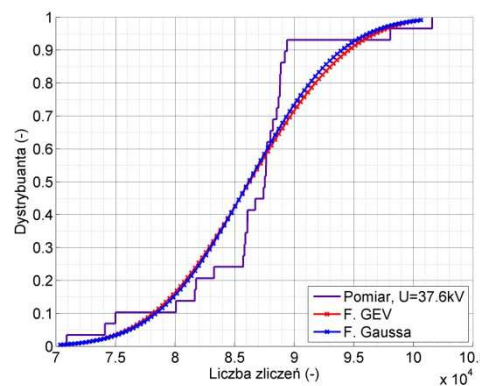
c)



d)

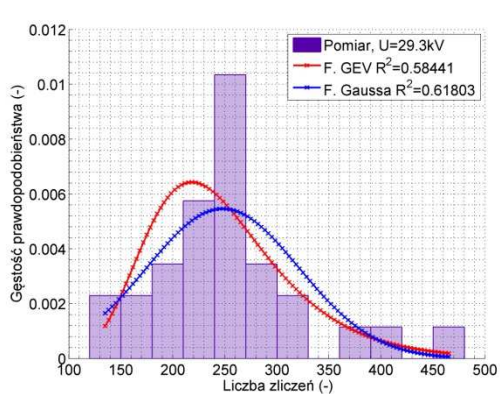


e)

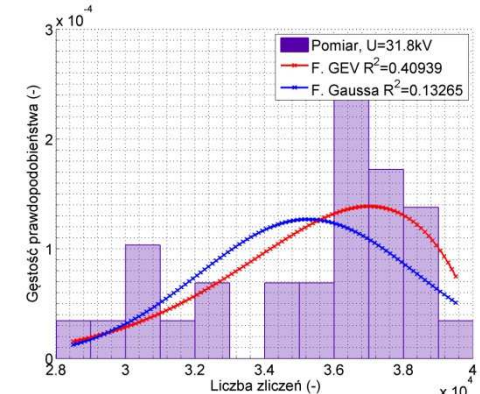


f)

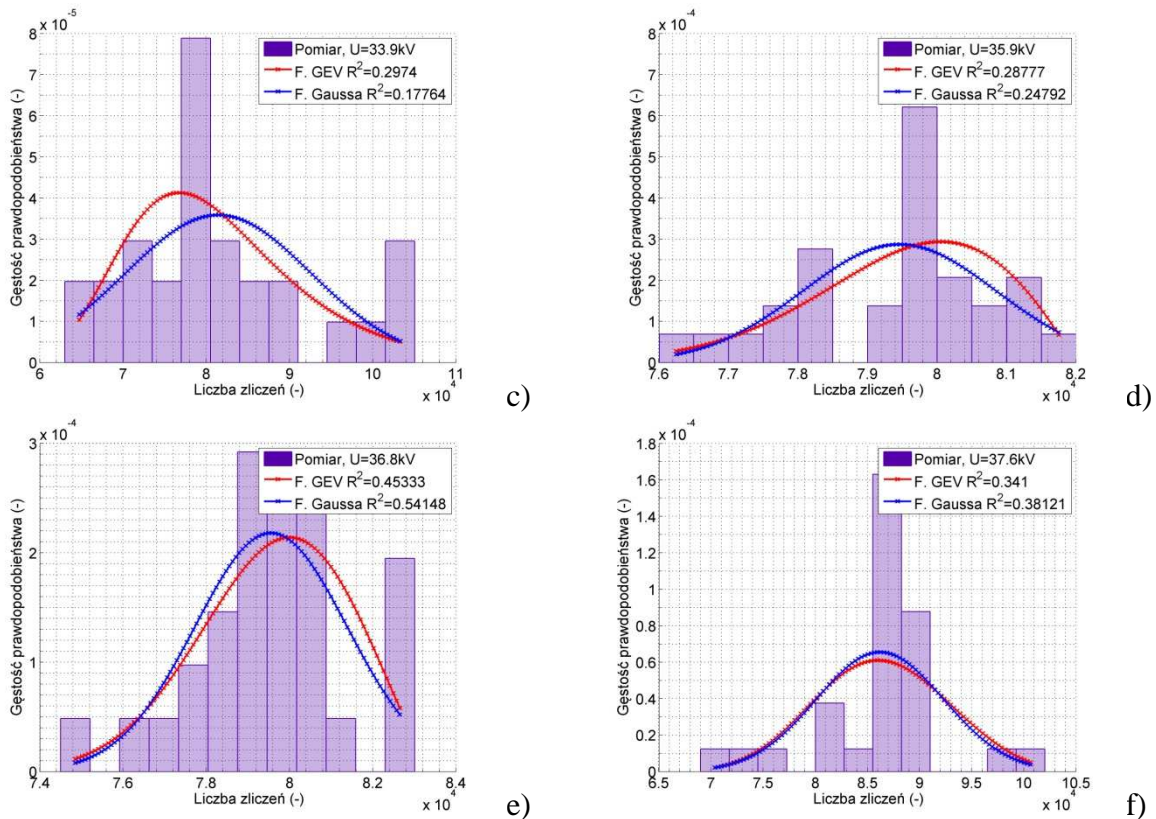
Rys. 9 Dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,71 U_p = 29,3 \text{ kV}$; b) $0,77 U_p = 31,8 \text{ kV}$; c) $0,82 U_p = 33,9 \text{ kV}$; d) $0,87 U_p = 35,9 \text{ kV}$; e) $0,89 U_p = 36,8 \text{ kV}$; f) $0,91 U_p = 37,6 \text{ kV}$.



a)

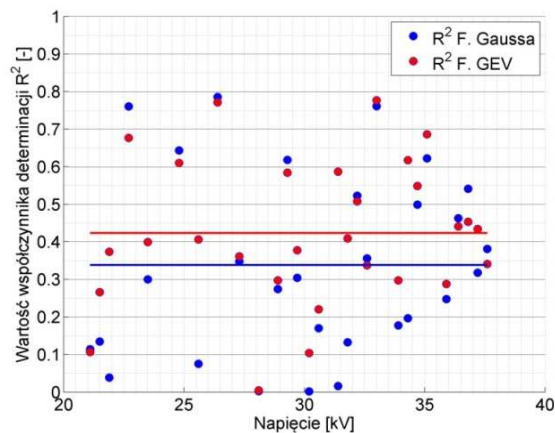


b)



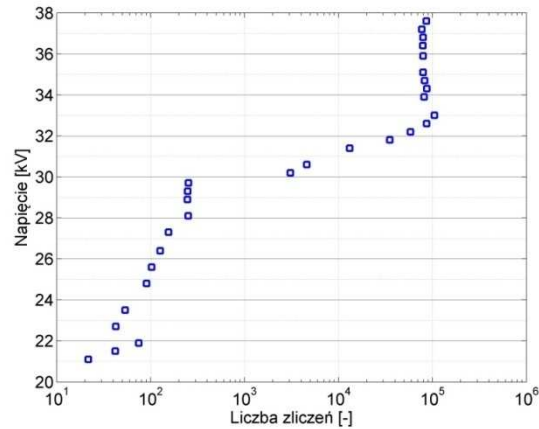
Rys. 10 Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ:
a) 0,71 $U_p = 29,3$ kV; b) 0,77 $U_p = 31,8$ kV; c) 0,82 $U_p = 33,9$ kV; d) 0,87 $U_p = 35,9$ kV;
e) 0,89 $U_p = 36,8$ kV; f) 0,91 $U_p = 37,6$ kV.

Na rys. 11 przedstawiono wartości współczynników determinacji R^2 obliczonego ze wzoru (4.5). Wartości obliczono dla wszystkich wyznaczonych rozkładów liczebności. Kolorem czerwonym zaznaczono dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - dla funkcji Gaussa. Dodatkowo linią ciągłą wskazano wartości średniej arytmetycznej. Przedstawione na rys. 11 zestawienie umożliwiło podsumowanie wykonanej analizy stochastyczności, która wykazała, że charakter obserwowanej liczby punktów emisyjnych można częściej opisać rozkładem GEV. Niskie wartości współczynnika R^2 występują częściej dla rozkładu Gaussa.



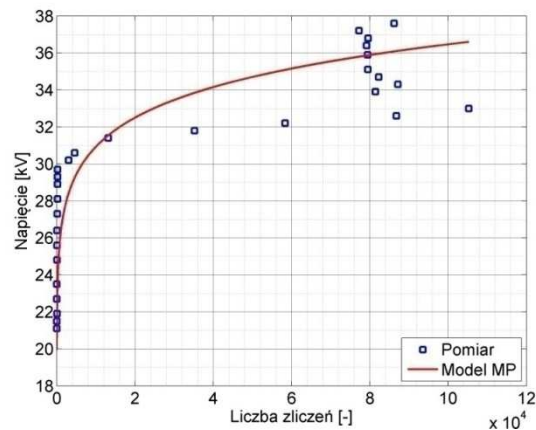
Rys. 11 Zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji obliczonych dla obu rozpatrywanych teoretycznych rozkładów liczebności w funkcji napięcia generacji WNZ.

Na rys. 12 przedstawiono zależność wielkości napięcia podawanego na walec izolacyjny ceramiczny wypełniony powietrzem od uśrednionej liczby punktów emisyjnych emitowanych przez generowane wyładowania. Oś odciętych przedstawiono w skali logarytmicznej.

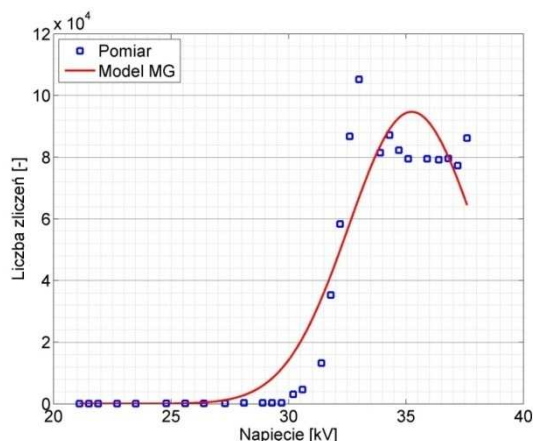


Rys. 12 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, wykres logarytmiczny.

Na rys. 13 kolorem niebieskim przedstawiono zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MP. Na rys. 14 kolorem niebieskim przedstawiono zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MG. W tabelicy 3 zestawiono wartości parametrów dopasowania, obliczonych wg wzorów (4.10-13) dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. W tabelicy 4 zestawiono wartości estymowanych parametrów dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników *R-square* i *adj-R-square* stwierdzono znacznie lepsze dopasowanie modelu MG względem modelu MP. Natomiast wartości *RMSE* i *SSE*, które są znacząco bardziej zbliżone do zera dla modelu MP wskazują na możliwość zastosowania modelu MP do predykcji liczby punktów emisyjnych w zależności od napięcia generacji WNZ. Ze względu na wysokie wartości parametrów *RMSE* i *SSE* dla modelu MG nie należy zalecać jego stosowania do predykcji.



Rys. 13 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń* oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MP.



Rys. 14 Zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MG.

Tablica 3

Obliczone wartości parametrów dopasowania modeli regresyjnych.

Zestawienie parametrów określających jakość dopasowania modeli do danych empirycznych					
Nazwa	SSE	R-square	dfe	adj-R-square	RMSE
Wartość MG	4554704581	0,9	26	0,892	13235
Wartość MP	230,756	0,681	26	0,656	2,979

Tablica 4

Estymowane wartości parametrów modeli regresyjnych.

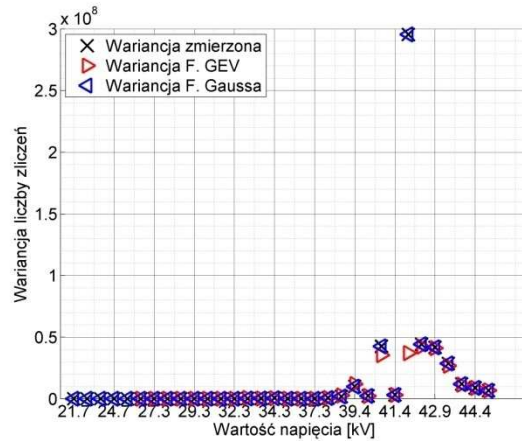
Estymowane wartości parametrów modeli			
Nazwa	A	B	C
Wartość MG	94708	35,24	3,80
Wartość MP	15,997	0,07156	0,00045

3. Odległości między elektrodami 9 cm

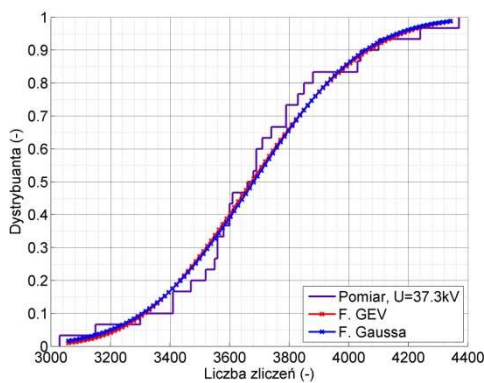
Na rys. 15 przedstawiono zależność liczby punktów emisyjnych (wariancja) emitowanych przez wyładowania generowane w walcu izolacyjnym ceramicznym wypełnionym powietrzem od wielkości podawanego napięcia. Krzyżykiem oznaczono wariancję zmiennej *liczba zliczeń* zarejestrowanych podczas pomiarów. Czerwonym trójkątem oznaczono wariancję uzyskaną z teoretycznego rozkładu obliczonego z wykorzystaniem funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Zaobserwowano wzrost wariancji dla napięć w zakresie 0,81-0,87 w odniesieniu do napięcia przebicia U_p . Zaprezentowane wartości są w większości przypadków wielkości zmierzonych i obliczonych jednakowe. Największą wariancję wskazano dla napięcia 0,83 % U_p .

Na rys. 16 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,74 b) 0,78 c) 0,80 d) 0,82 e) 0,85 f) 0,89 [w odniesieniu do U_p]. Na rys. 17 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,74 b) 0,78 c) 0,80 d) 0,82 e) 0,85 f) 0,89 [w odniesieniu do U_p]. Kolorem fioletowym zaznaczono

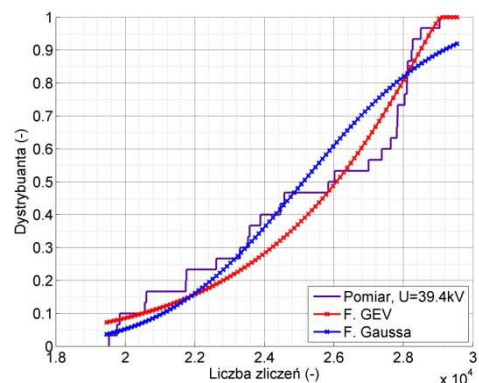
dane dotyczące wyników pomiarów, kolorem czerwonym dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Obliczenie histogramów i określenie teoretycznych rozkładów liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) oraz empirycznych dystrybucji umożliwiło potwierdzenie stochastycznej natury badanego zjawiska. Analiza dystrybucji pozwoliła na określenie najczęściej występujących wartości liczby zliczeń dla poszczególnych napięć generacji WNZ. Rozkłady liczebności pozwoliły na określenie liczby modów rozkładu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że dla wartości napięcia powyżej 47 kV, tj. $0,79 U_p$ rozkłady można opisywać rozkładem GEV lub Gaussa.



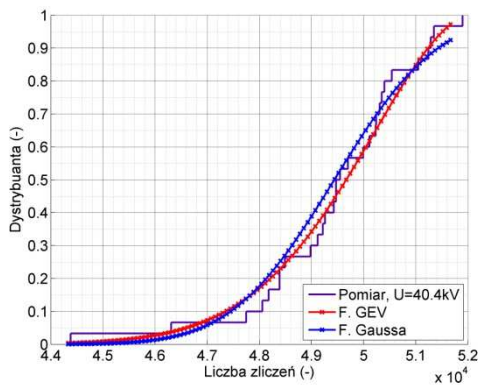
Rys. 15 Zależność wariancji zmiennej liczba zliczeń od wielkości podawanego napięcia.



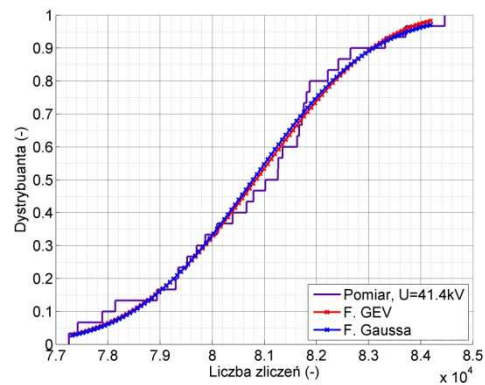
a)



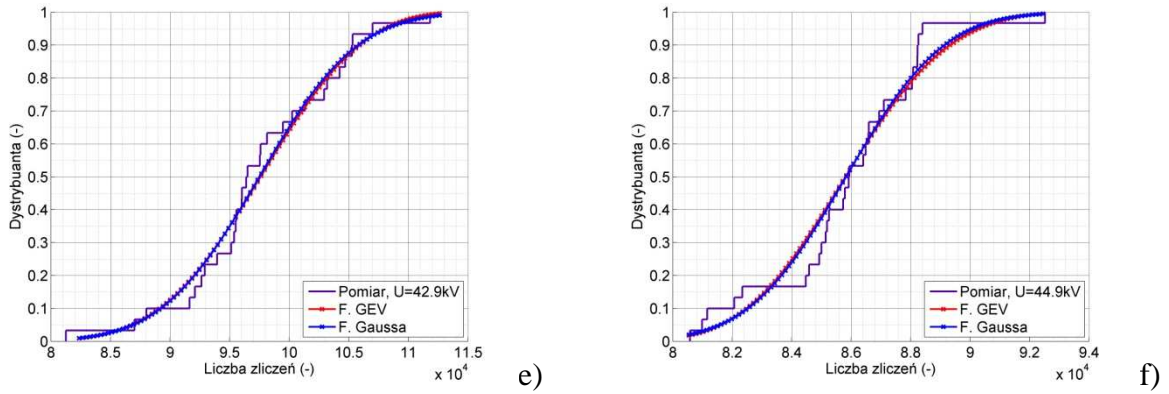
b)



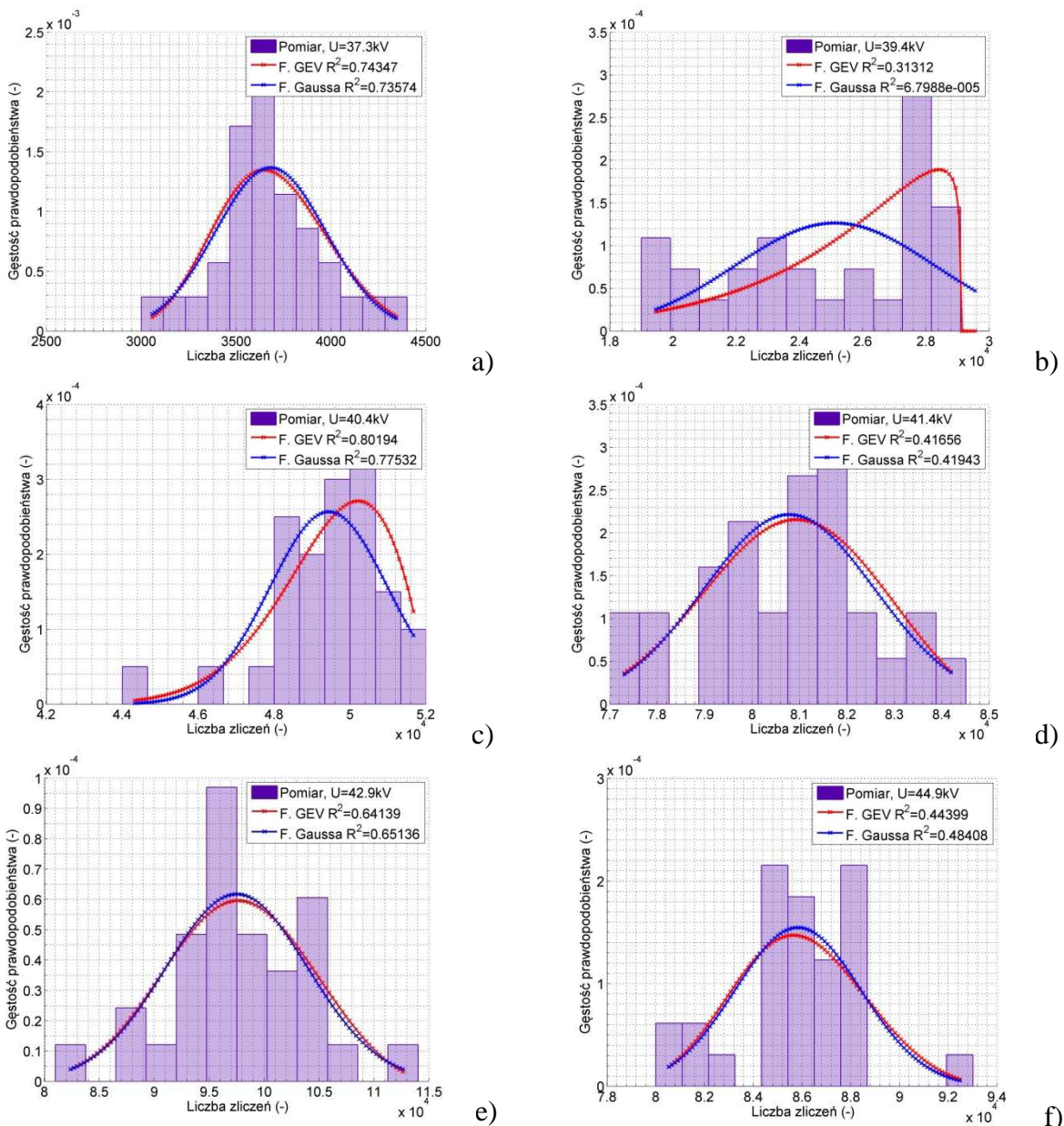
c)



d)

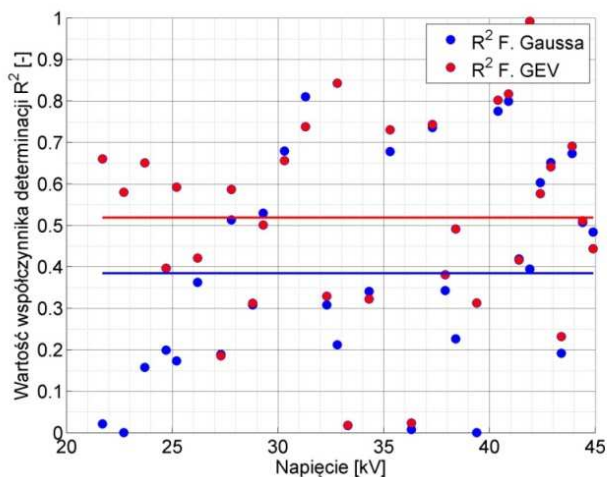


Rys. 16 Dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,74 U_p = 37,3$ kV; b) $0,78 U_p = 39,4$ kV; c) $0,80 U_p = 40,4$ kV; d) $0,82 U_p = 41,4$ kV; e) $0,85 U_p = 42,9$ kV; f) $0,89 U_p = 44,9$ kV.



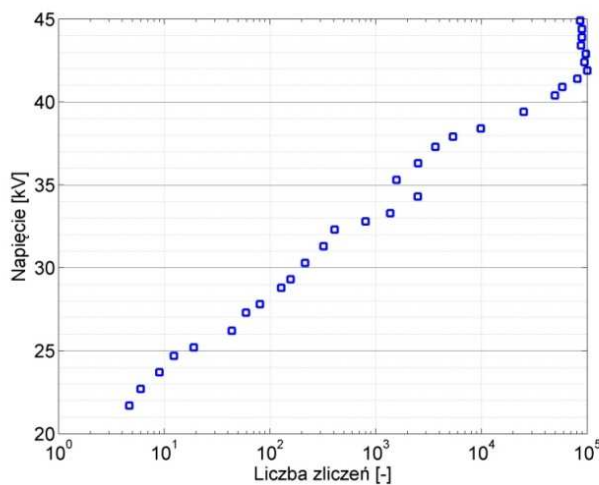
Rys. 17 Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,74 U_p = 37,3$ kV; b) $0,78 U_p = 39,4$ kV; c) $0,80 U_p = 40,4$ kV; d) $0,82 U_p = 41,4$ kV; e) $0,85 U_p = 42,9$ kV; f) $0,89 U_p = 44,9$ kV.

Na rys. 18 przedstawiono wartości współczynników determinacji R^2 obliczonego ze wzoru (4.5). Wartości obliczono dla wszystkich wyznaczonych rozkładów liczebności. Kolorem czerwonym zaznaczono dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - dla funkcji Gaussa. Dodatkowo linią ciągłą wskazano wartości średniej arytmetycznej. Przedstawione na rys. 18 zestawienie umożliwiło podsumowanie wykonanej analizy stochastyczności, która wykazała, że charakter obserwowanej liczby punktów emisyjnych można częściej opisać rozkładem GEV. Niskie wartości współczynnika R^2 występują częściej dla rozkładu Gaussa.



Rys. 18 Zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji obliczonych dla obu rozpatrywanych teoretycznych rozkładów liczebności w funkcji napięcia generacji WNZ.

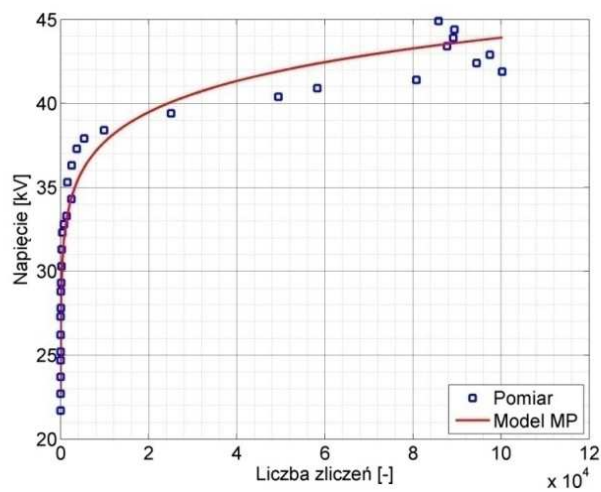
Na rys. 19 przedstawiono zależność wielkości napięcia podawanego na walec izolacyjny ceramiczny wypełniony powietrzem od uśrednionej liczby punktów emisyjnych emitowanych przez generowane wyładowania. Oś odciętych przedstawiono w skali logarytmicznej.



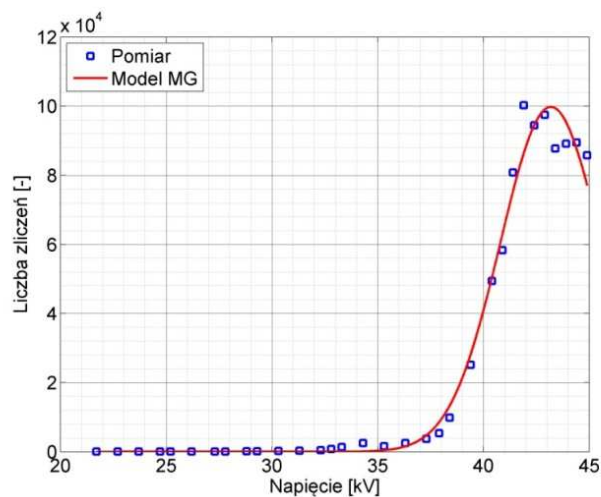
Rys. 19 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, wykres logarytmiczny.

Na rys. 20 kolorem niebieskim przedstawiono zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej

z wykorzystaniem modelu MP. Na rys. 21 kolorem niebieskim przedstawiono zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MG. W tabelicy 5 zestawiono wartości parametrów dopasowania, obliczonych wg wzorów (4.10-13) dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. W tabelicy 6 zestawiono wartości estymowanych parametrów dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników *R-square* i *adj-R-square* stwierdzono doskonałe dopasowanie modeli MG i MP. Natomiast wartości *RMSE* i *SSE*, które są znacząco bardziej zbliżone do zera dla modelu MP wskazują na możliwość zastosowania modelu MP do predykcji liczby punktów emisyjnych w zależności od napięcia generacji WNZ. Ze względu na wysokie wartości parametrów *RMSE* i *SSE* dla modelu MG nie zaleca się jego stosowania do predykcji.



Rys. 20 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń* oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MP.



Rys. 21 Zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MG.

Obliczone wartości parametrów dopasowania modeli regresyjnych

Zestawienie parametrów określających jakość dopasowania modeli do danych empirycznych					
Nazwa	SSE	R-square	dfe	adj-R-square	RMSE
Wartość MG	548567181	0,988	29	0,988	4349
Wartość MP	42,29	0,973	29	0,972	1,207

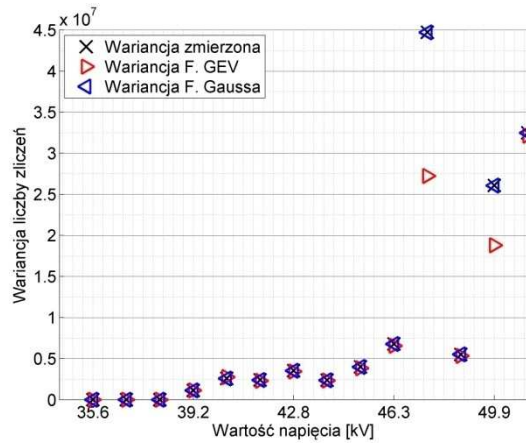
Estymowane wartości parametrów modeli regresyjnych

Estymowane wartości parametrów modeli			
Nazwa	A	B	C
Wartość MG	99983	50,83	4,010
Wartość MP	20,49	0,066	8,558e-5

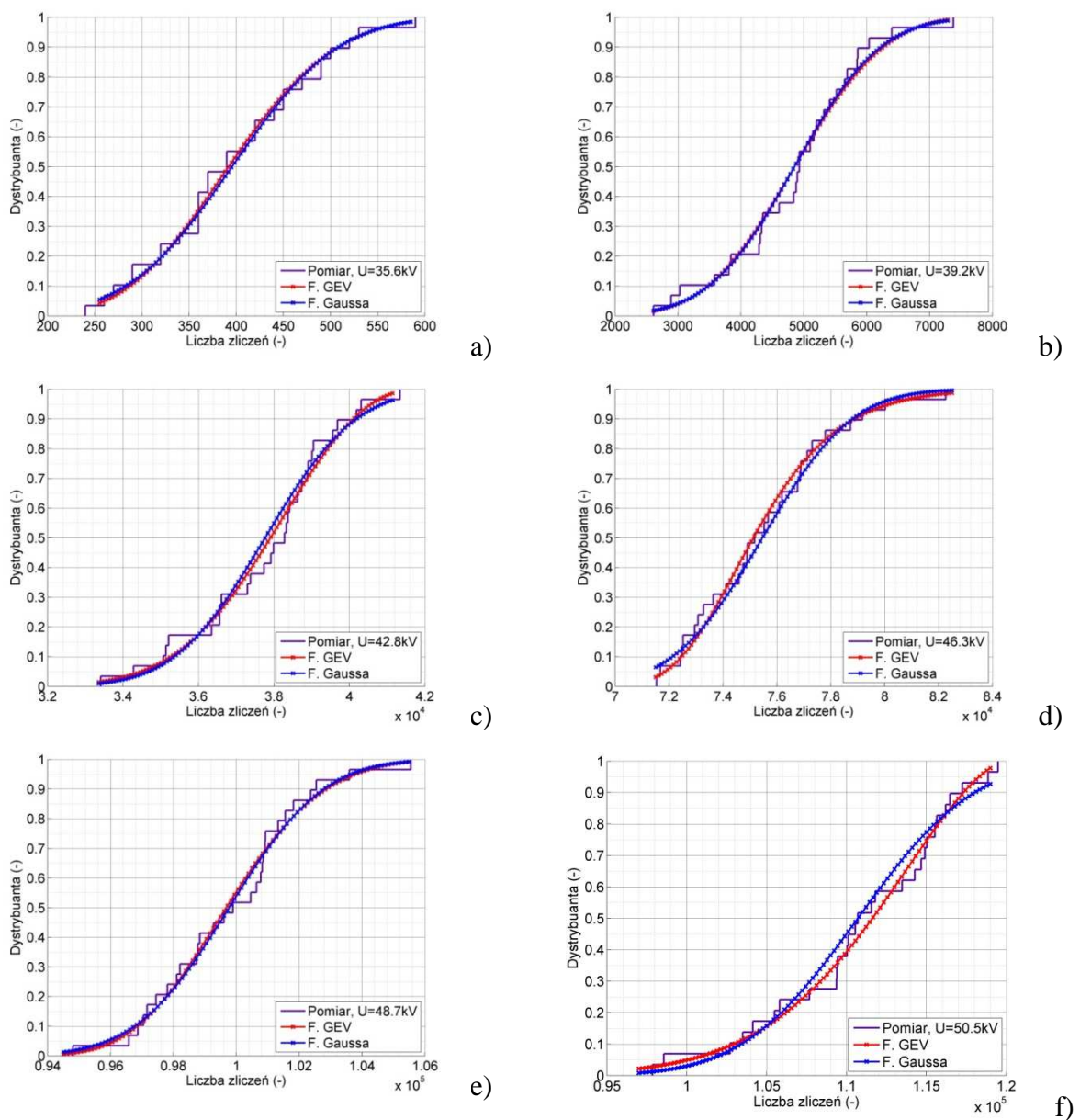
4. Odległości między elektrodami 11 cm

Na rys. 22 przedstawiono zależność liczby punktów emisyjnych (wariancja) emitowanych przez wyładowania generowane w walcu izolacyjnym ceramicznym wypełnionym powietrzem od wielkości podawanego napięcia. Krzyżykiem oznaczono wariancję zmiennej *liczba zliczeń* zarejestrowanych podczas pomiarów. Czerwonym trójkątem oznaczono wariancję uzyskaną z teoretycznego rozkładu obliczonego z wykorzystaniem funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Zaobserwowano wzrost wariancji dla napięć przekraczających 0,8 w odniesieniu do napięcia przebicia U_p . Zaprezentowane wartości są w większości przypadków wielkości zmierzonych i obliczonych jednakowe. Wyjątek stanowią pojedyncze różnice dla funkcji GEV.

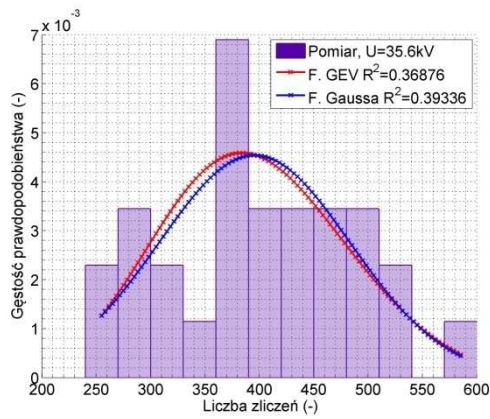
Na rys. 23 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,6 b) 0,66 c) 0,72 d) 0,78 e) 0,82 f) 0,85 [w odniesieniu do U_p]. Na rys. 24 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,6 b) 0,66 c) 0,72 d) 0,78 e) 0,82 f) 0,85 [w odniesieniu do U_p]. Kolorem fioletowym zaznaczono dane dotyczące wyników pomiarów, kolorem czerwonym dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Obliczenie histogramów i określenie teoretycznych rozkładów liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) oraz empirycznych dystrybuant umożliwiło potwierdzenie stochastycznej natury badanego zjawiska. Analiza dystrybuant pozwoliła na określenie najczęściej występujących wartości liczby zliczeń dla poszczególnych napięć generacji WNZ. Rozkłady liczebności pozwoliły na określenie liczby modów rozkładu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że otrzymane rozkłady można opisywać modelami GEV lub Gaussa w przypadku generacji WNZ układu napięciem przekraczającym wartość $0,72 U_p$, tj. 36 kV.



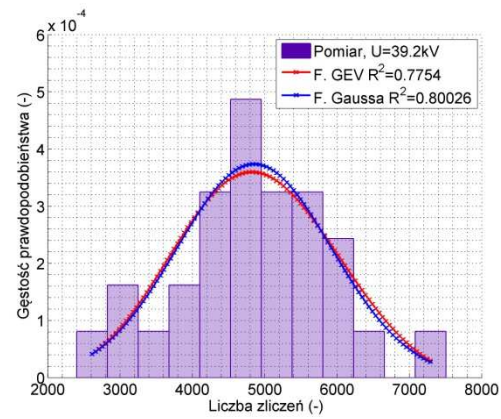
Rys. 22 Zależność wariancji zmiennej liczba zliczeń od wielkości podawanego napięcia.



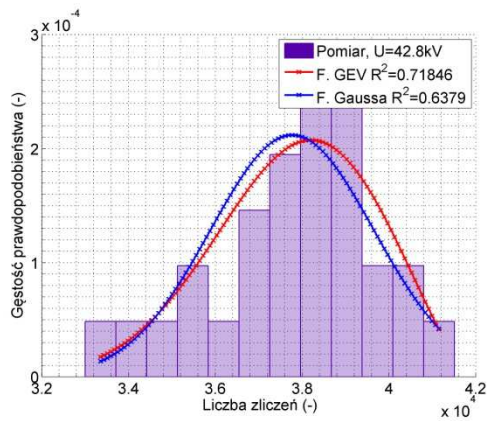
Rys. 23 Dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,6 U_p = 35,6$ kV; b) $0,66 U_p = 39,2$ kV; c) $0,72 U_p = 42,8$ kV; d) $0,78 U_p = 46,3$ kV; e) $0,82 U_p = 48,7$ kV; f) $0,85 U_p = 50,5$ kV.



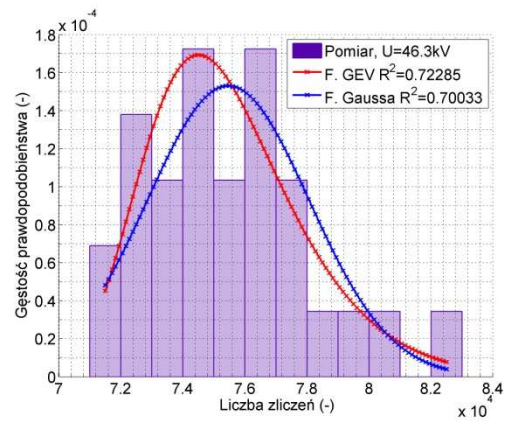
a)



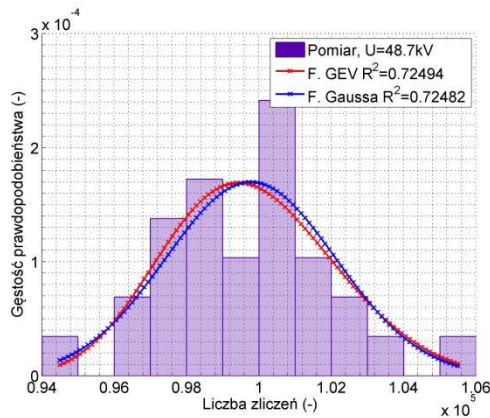
b)



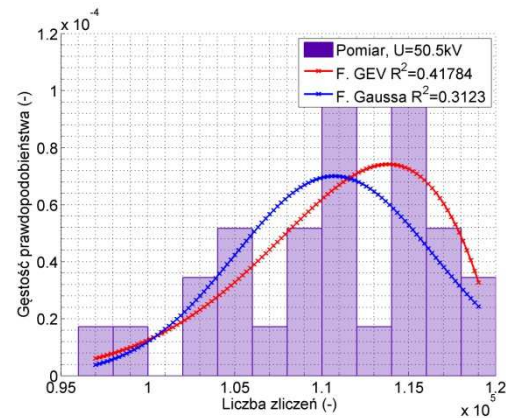
c)



d)



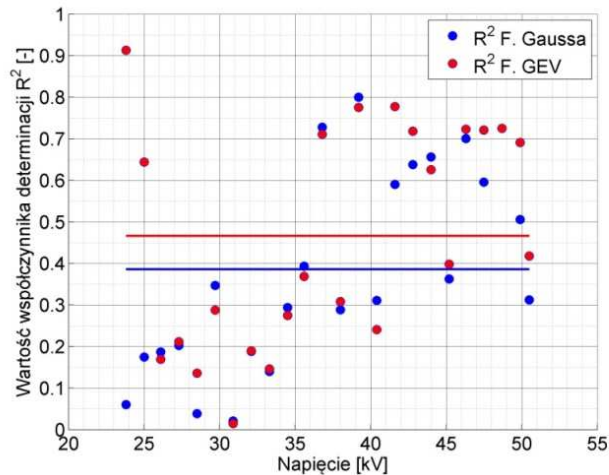
e)



f)

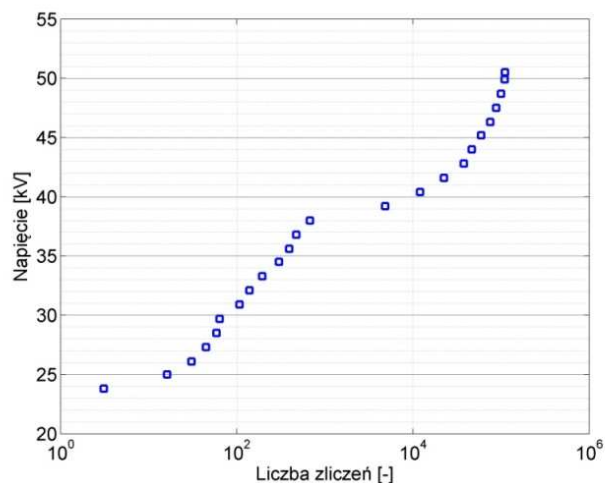
Rys. 24 Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,6 U_p = 35,6$ kV; b) $0,66 U_p = 39,2$ kV; c) $0,72 U_p = 42,8$ kV; d) $0,78 U_p = 46,3$ kV; e) $0,82 U_p = 48,7$ kV; f) $0,85 U_p = 50,5$ kV.

Na rys. 25 przedstawiono wartości współczynników determinacji R^2 obliczonego ze wzoru (4.5). Wartości obliczono dla wszystkich wyznaczonych rozkładów liczebności. Kolorem czerwonym zaznaczono dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - dla funkcji Gaussa. Dodatkowo linią ciągłą wskazano wartości średniej arytmetycznej. Przedstawione na rys. 25 zestawienie umożliwiło podsumowanie wykonanej analizy stochastyczności, która wykazała, że charakter obserwowanej liczby punktów emisyjnych można częściej opisać rozkładem GEV. Niskie wartości współczynnika R^2 występują częściej dla rozkładu Gaussa.



Rys. 25 Zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji obliczonych dla obu rozpatrywanych teoretycznych rozkładów liczebności w funkcji napięcia generacji WNZ.

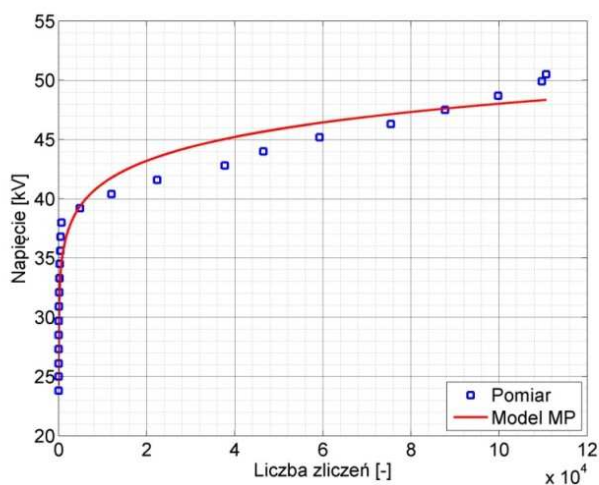
Na rys. 26 przedstawiono zależność wielkości napięcia podawanego na walec izolacyjny ceramiczny wypełniony powietrzem od uśrednionej liczby punktów emisyjnych emitowanych przez generowane wyładowania. Oś odciętych przedstawiono w skali logarytmicznej.



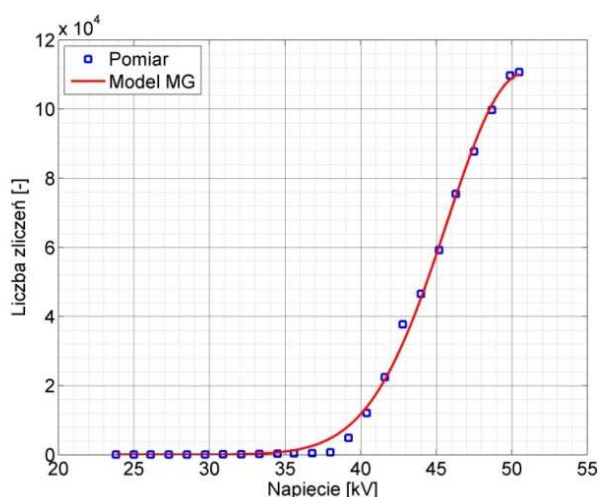
Rys. 26 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, wykres logarytmiczny.

Na rys. 27 kolorem niebieskim przedstawiono zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MP. Na rys. 28 kolorem niebieskim przedstawiono zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MG. W tabelicy 7 zestawiono wartości parametrów dopasowania, obliczonych wg wzorów (4.10-13) dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. W tabelicy 8 zestawiono wartości estymowanych parametrów dla obu rozpatrywanych modeli regresyjnych. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników *R-square* i *adj-R-square* stwierdzono jednakowo doskonale dopasowanie obu modeli. Natomiast wartości *RMSE* i *SSE*, które są znacząco bardziej zbliżone do zera dla modelu MP

wskazują na możliwość zastosowania modelu MP do predykcji liczby punktów emisyjnych w zależności od napięcia generacji WNZ. Ze względu na wysokie wartości parametrów *RMSE* i *SSE* dla modelu MG nie należy zalecać jego stosowania do predykcji.



Rys. 27 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń* oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MP.



Rys. 28 Zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MG.

Tablica 7

Obliczone wartości parametrów dopasowania modeli regresyjnych.

Zestawienie parametrów określających jakość dopasowania modeli do danych empirycznych					
Nazwa	SSE	R-square	dfc	adj-R-square	RMSE
Wartość MG	78050077	0,997	21	0,997	1927
Wartość MP	67,44	0,958	22	0,956	1,751

Tablica 8

Estymowane wartości parametrów modeli regresyjnych.

Estymowane wartości parametrów modeli			
Nazwa	A	B	C
Wartość MG	110247	50,78	7,21
Wartość MP	22,511	0,0658	8,68e-07

ZAŁĄCZNIK NR 2

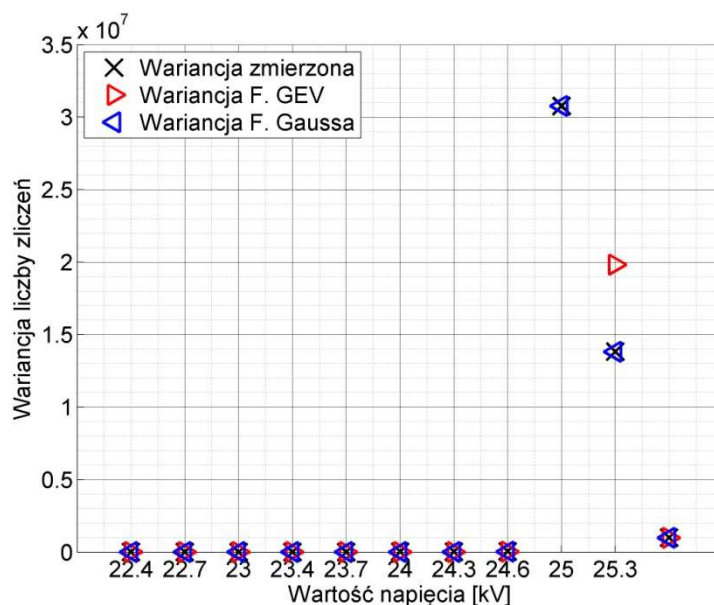
WYNIKI ANALIZY WIDM EMISYJNYCH WYŁADOWAŃ WYSTĘPUJĄCYCH NA POWIERZCHNI CERAMICZNEGO WALCA IZOLACYJNEGO WYPEŁNIONEGO KWARCEM

- 1. Odległość między elektrodami 5 cm**

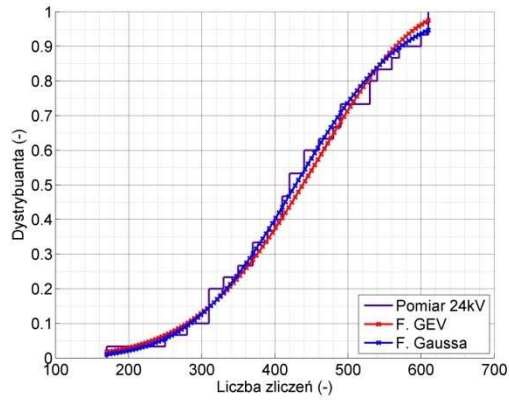
1. Odległość między elektrodami 5 cm

Na rys. 1 przedstawiono zależność liczby punktów emisyjnych (wariancja) emitowanych przez wyładowania generowane w walcu izolacyjnym ceramicznym wypełnionym kwarcem od wielkości podawanego napięcia. Krzyżykiem oznaczono wariancję zmiennej *liczba zliczeń* zarejestrowanych podczas pomiarów. Czerwonym trójkątem oznaczono wariancję uzyskaną z teoretycznego rozkładu obliczonego z wykorzystaniem funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Zaobserwowano wzrost wariancji dla napięć w zakresie 0,78-0,79 w odniesieniu do napięcia przebicia U_p . Zaprezentowane wartości są w większości przypadków wielkości zmierzonych i obliczonych jednakowe.

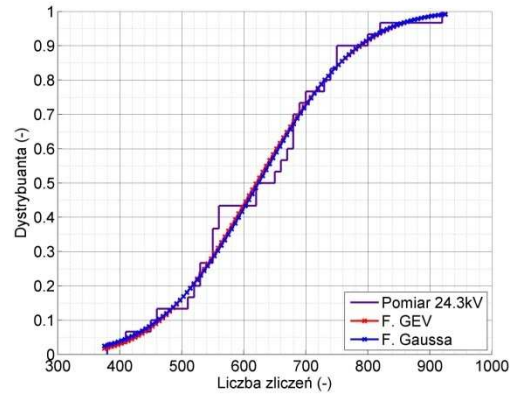
Na rys. 2 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,75 b) 0,76 c) 0,77 d) 0,78 e) 0,79 f) 0,8 [w odniesieniu do U_p]. Na rys. 3 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) 0,75 b) 0,76 c) 0,77 d) 0,78 e) 0,79 f) 0,8 [w odniesieniu do U_p]. Kolorem fioletowym zaznaczono dane dotyczące wyników pomiarów, kolorem czerwonym dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - funkcji Gaussa. Obliczenie histogramów i określenie teoretycznych rozkładów liczebności (gęstości prawdopodobieństwa) oraz empirycznych dystrybuant umożliwiło potwierdzenie stochastycznej natury badanego zjawiska. Analiza dystrybuant pozwoliła na określenie najczęściej występujących wartości liczby zliczeń dla poszczególnych napięć generacji WNZ. Rozkłady liczebności pozwoliły na określenie liczby modów rozkładu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że rozkłady można opisywać obiema funkcjami gęstości prawdopodobieństwa dla napięć powyżej 23 kV, tj. 0,72 w odniesieniu do U_p .



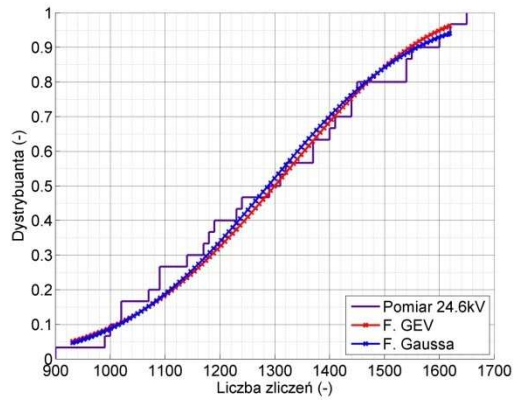
Rys. 1 Zależność wariancji zmiennej *liczba zliczeń* od wielkości podawanego napięcia.



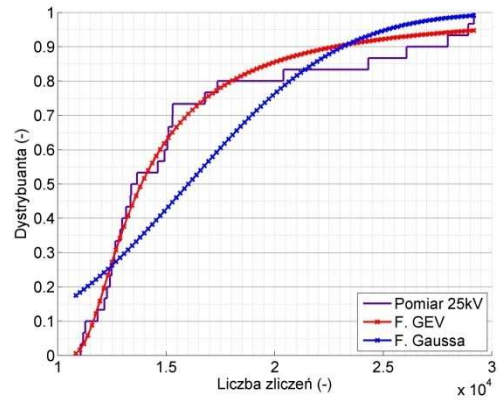
a)



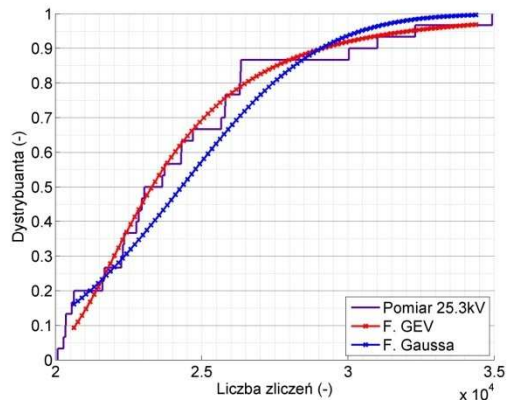
b)



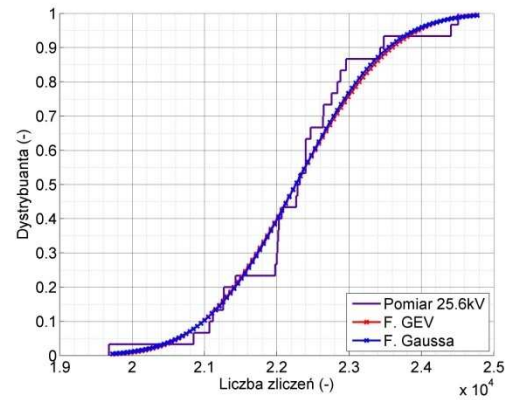
c)



d)

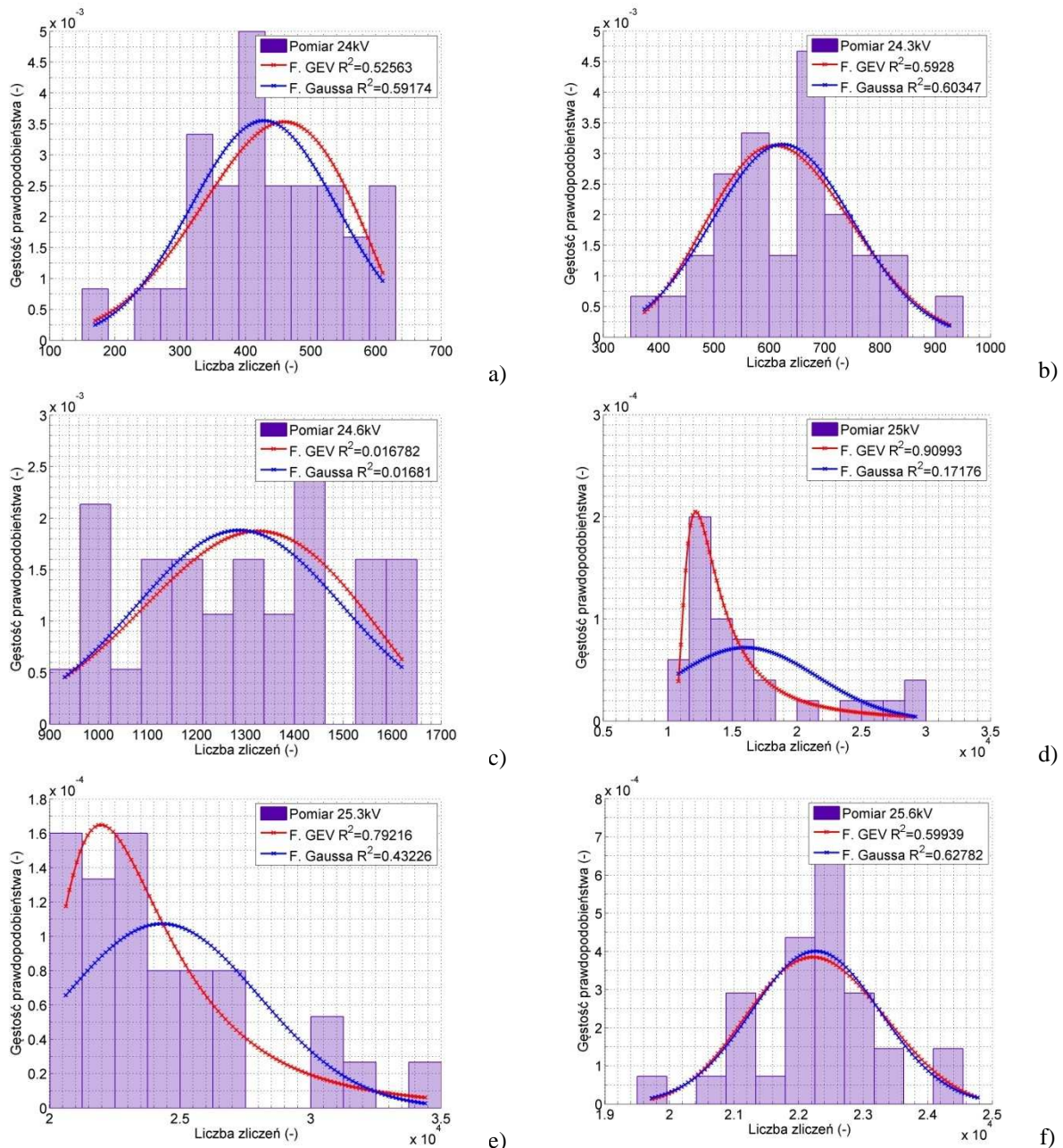


e)



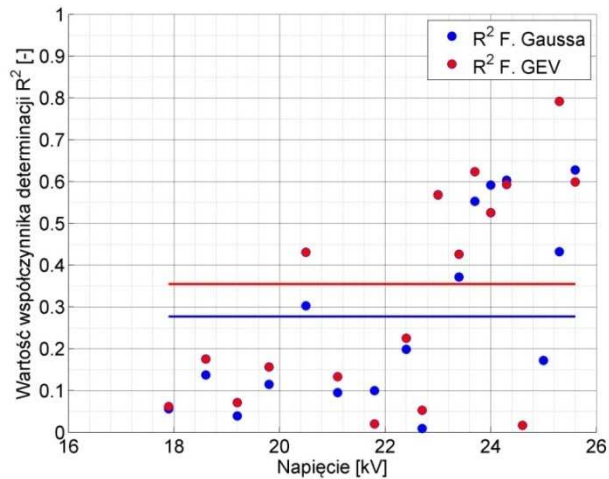
f)

Rys. 2 Dystrybuanty empiryczne rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,75 U_p = 24 \text{ kV}$; b) $0,76 U_p = 24,3 \text{ kV}$; c) $0,77 U_p = 24,6 \text{ kV}$; d) $0,78 U_p = 25 \text{ kV}$; e) $0,79 U_p = 25,3 \text{ kV}$; f) $0,8 U_p = 25,6 \text{ kV}$.



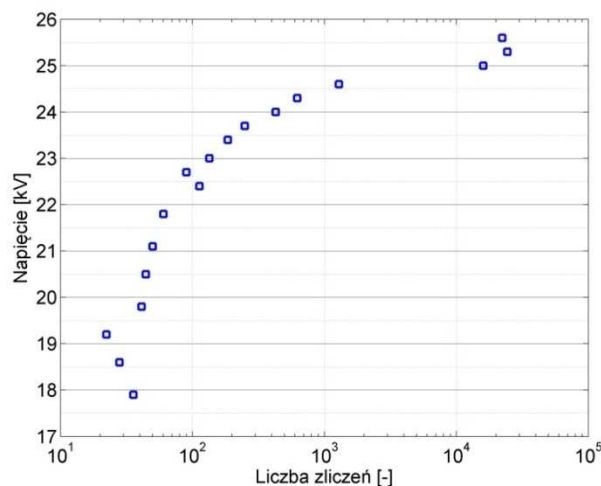
Rys. 3 Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ:
a) $0,75 U_p = 24$ kV; b) $0,76 U_p = 24,3$ kV; c) $0,77 U_p = 24,6$ kV; d) $0,78 U_p = 25$ kV; e) $0,79 U_p = 25,3$ kV;
f) $0,8 U_p = 25,6$ kV.

Na rys. 4 przedstawiono wartości współczynników determinacji R^2 obliczonego ze wzoru (4.5). Wartości obliczono dla wszystkich wyznaczonych rozkładów liczebności. Kolorem czerwonym zaznaczono dane uzyskane dla funkcji GEV, natomiast w kolorze niebieskim - dla funkcji Gaussa. Dodatkowo linią ciągłą wskazano wartości średniej arytmetycznej. Przedstawione na rysunku zestawienie umożliwiło podsumowanie wykonanej analizy stochastyczności, która wykazała, że charakter obserwowanej liczby punktów emisyjnych można częściej opisać rozkładem GEV. Jedynie dla najwyższych napięć występują większe wartości współczynnika R^2 .



Rys. 4 Zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji obliczonych dla oby rozpatrywanych teoretycznych rozkładów liczebności w funkcji napięcia generacji WNZ.

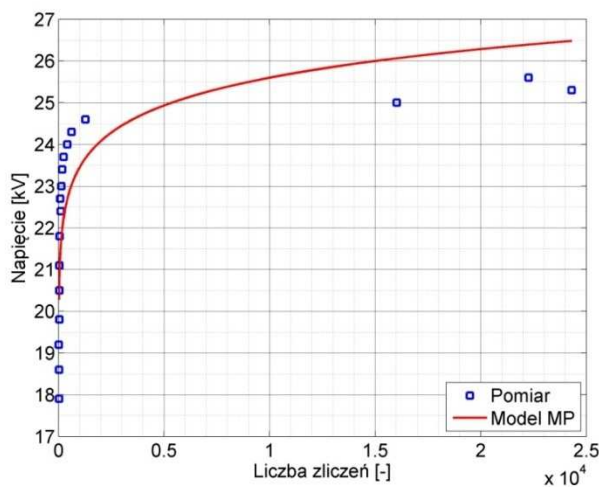
Na rys. 5 przedstawiono zależność wielkości napięcia podawanego na walec izolacyjny ceramiczny wypełniony kwarcem od uśrednionej liczby punktów emisyjnych emitowanych przez generowane wyładowania. Oś odciętych przedstawiono w skali logarytmicznej.



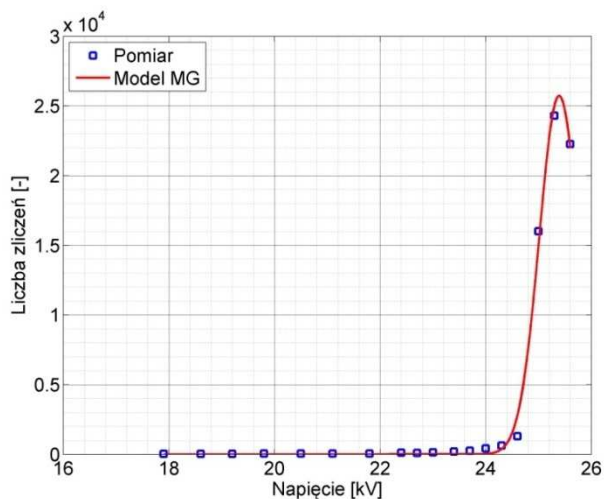
Rys. 5 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, wykres logarytmiczny.

Na rys. 6 kolorem niebieskim przedstawiono zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń*, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MP. Na rys. 7 kolorem niebieskim przedstawiono zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ, a kolorem czerwonym wynik aproksymacji wykonanej z wykorzystaniem modelu MG. W tablicy 1 zestawiono wartości parametrów dopasowania, obliczonych wg wzorów (4.10-13) dla oby rozpatrywanych modeli regresyjnych. W tablicy 2 zestawiono wartości estymowanych parametrów dla oby rozpatrywanych modeli regresyjnych. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników *R-square* i *adj-R-square* stwierdzono znacznie lepsze dopasowanie modelu MG względem modelu MP. Natomiast wartości *RMSE* i *SSE*, które są znacząco bardziej zbliżone do zera dla modelu MP wskazują na możliwość zastosowania modelu MP do predykcji liczby punktów

emisyjnych w zależności od napięcia generacji WNZ. Ze względu na wysokie wartości parametrów *RMSE* i *SSE* dla modelu MG nie zaleca się jego stosowania do predykcji.



Rys. 6 Zależność napięcia generacji WNZ od zmiennej *liczba zliczeń* oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MP.



Rys. 7 Zależność zmiennej *liczba zliczeń* od napięcia generacji WNZ oraz wynik aproksymacji z wykorzystaniem modelu MG.

Tablica 1

Obliczone wartości parametrów dopasowania modeli regresyjnych.

Zestawienie parametrów określających jakość dopasowania modeli do danych empirycznych					
Nazwa	SSE	R-square	dfe	adj-R-square	RMSE
Wartość MG	4276745	0,996	15	0,995	533
Wartość MP	29,237	0,698	15	0,658	1,396

Tablica 2

Estymowane wartości parametrów modeli regresyjnych.

Estymowane wartości parametrów modeli			
Nazwa	A	B	C
Wartość MG	25737	25,39	0,53
Wartość MP	18,017	0,038	2,957e-05

**WYNIKI ANALIZY WIDM EMISYJNYCH WYŁADOWAŃ
ZAREJESTROWANYCH METODĄ SPEKTROFOTOMETRII.
WYŁADOWANIA GENEROWANE NA POWIERZCHNI CERAMICZNEGO
WALCA IZOLACYJNEGO WYPEŁNIONEGO KWARCEM.**

- 1. Odległość między elektrodami 5 cm**
 - 1.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych**
 - 1.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa**
 - 1.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa**

- 2. Odległość między elektrodami 7 cm**
 - 2.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych**
 - 2.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa**
 - 2.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa**

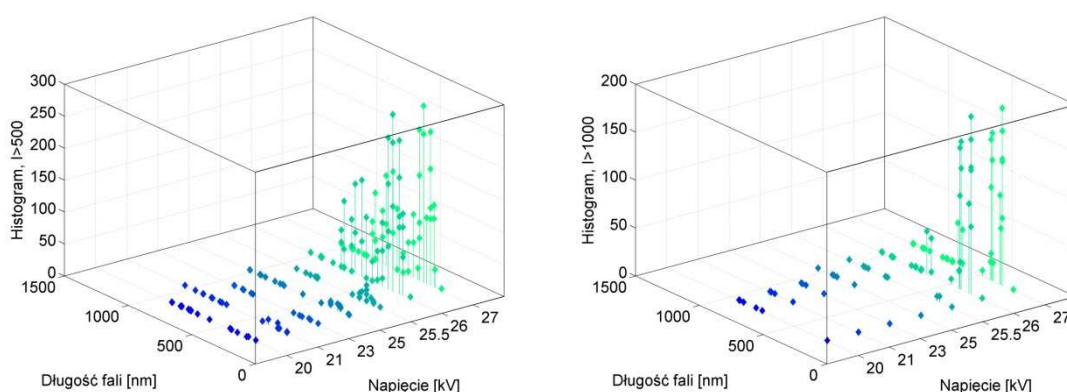
- 3. Odległość między elektrodami 9 cm**
 - 3.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych**
 - 3.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa**
 - 3.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa**

- 4. Odległość między elektrodami 11 cm**
 - 4.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych**
 - 4.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa**
 - 4.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa**

1. Odległość między elektrodami 5 cm

1.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych

Na rys. 1 przedstawiono zbiorcze zestawienie histogramów obliczonych dla widm o największych wartościach intensywności uzyskanych podczas pomiarów w funkcji napięcia generacji WNZ. Wykres po lewej dotyczy intensywności przekraczających wartość 500 ($I > 500$), wykres po prawej - intensywności przekraczających wartość 1000 ($I > 1000$). Na podstawie tej analizy możliwe jest określenie częstości występowania emisji świetlnej generowanej przez WNZ o danej długości fali.



Rys. 1 Zestawienie zbiorcze histogramów widm intensywności dla różnych wartości napięć. Po lewej: $I > 500$. Po prawej: $I > 1000$.

Na podstawie otrzymanych histogramów dla wartości intensywności przekraczających 1000 określono długości fal świetlnych dominujących w zarejestrowanych sygnałach, które zestawiono w tablicy 1.

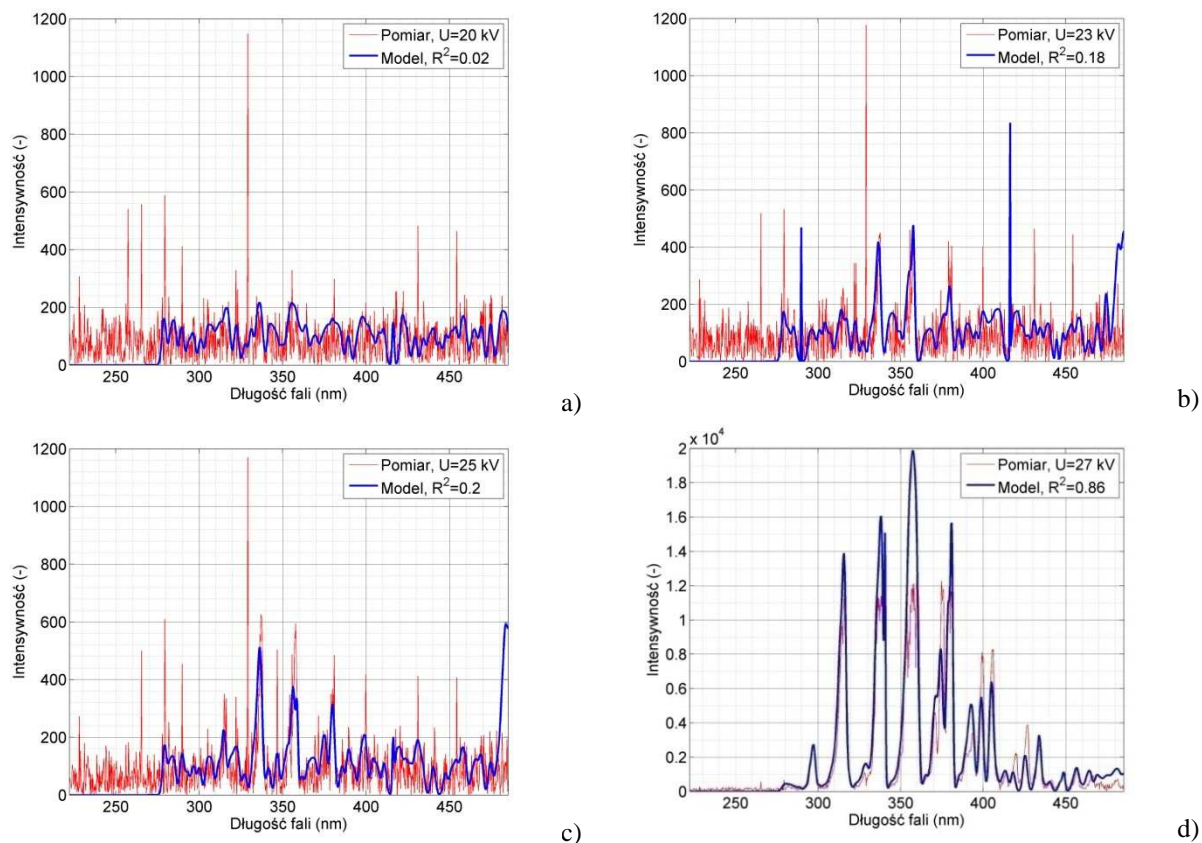
Tablica 1

Długości fal występujących w emisji świetlnej wykazującej wartość $I > 1000$.

Przedział długości fal [nm]	Wartości i przedziały długości dominujących fal występujące w emisji świetlnej wykazujące wartość intensywności $I > 1000$ [nm]
$\lambda = [200 - 299]$	203,295-299
$\lambda = [300 - 399]$	309-318, 328-329, 331-341, 349-362, 366-383, 386,388-399
$\lambda = [400 - 499]$	400-407,414,416, 418-421,424-428,431-435,449,456-458
$\lambda > 500$ n	607, 653-654,658-663,667-671,676-678,724, 745,774,793, 913, 933,1062,1073

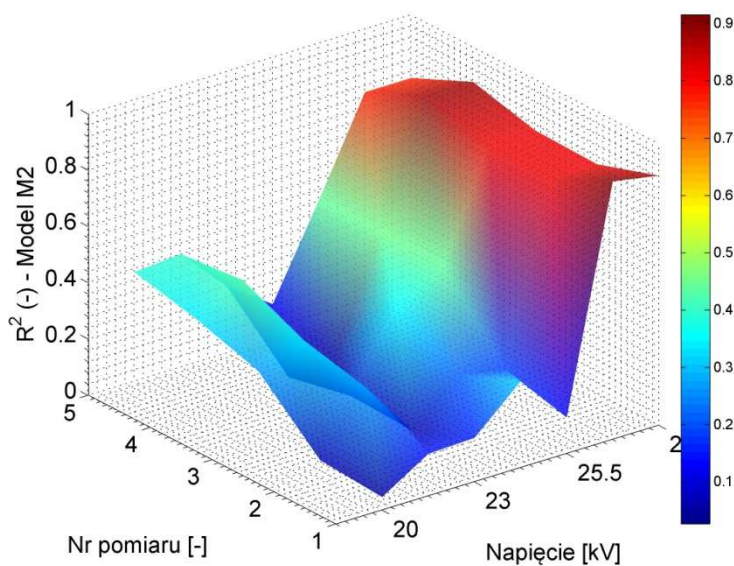
1.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa

Na rys. 2 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem szeregu Gaussa (4.16 - model M2) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik pomiarów, kolorem niebieskim - wynik modelowania. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



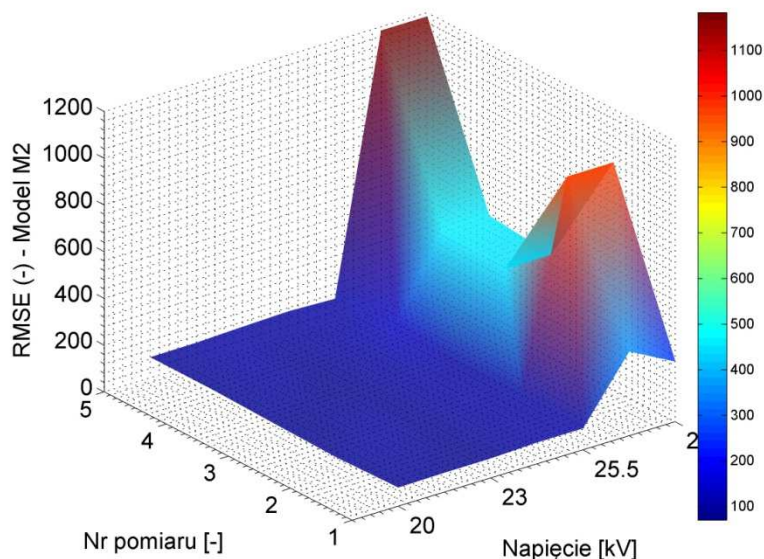
Rys. 2 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,72U_p=20$ kV, b) $0,90U_p=23$ kV, c) $0,94U_p=25$ kV, d) $0,97U_p=27$ kV.

Na rys. 3-5 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem szeregu Gaussa (model M2), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.

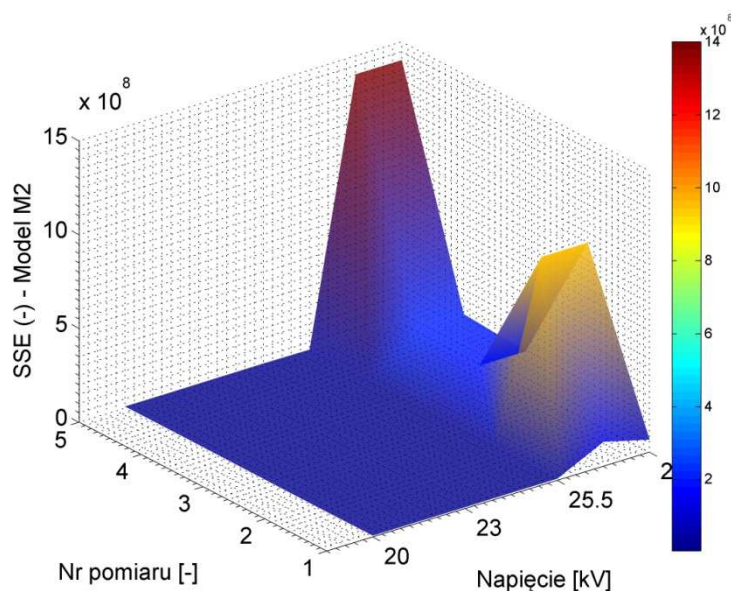


Rys. 3 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M2 w przeważającej większości przypadków uzyskuje doskonałe dopasowanie, o czym świadczą wartości bliskie jedności. Jedynie dla najmniejszych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach.



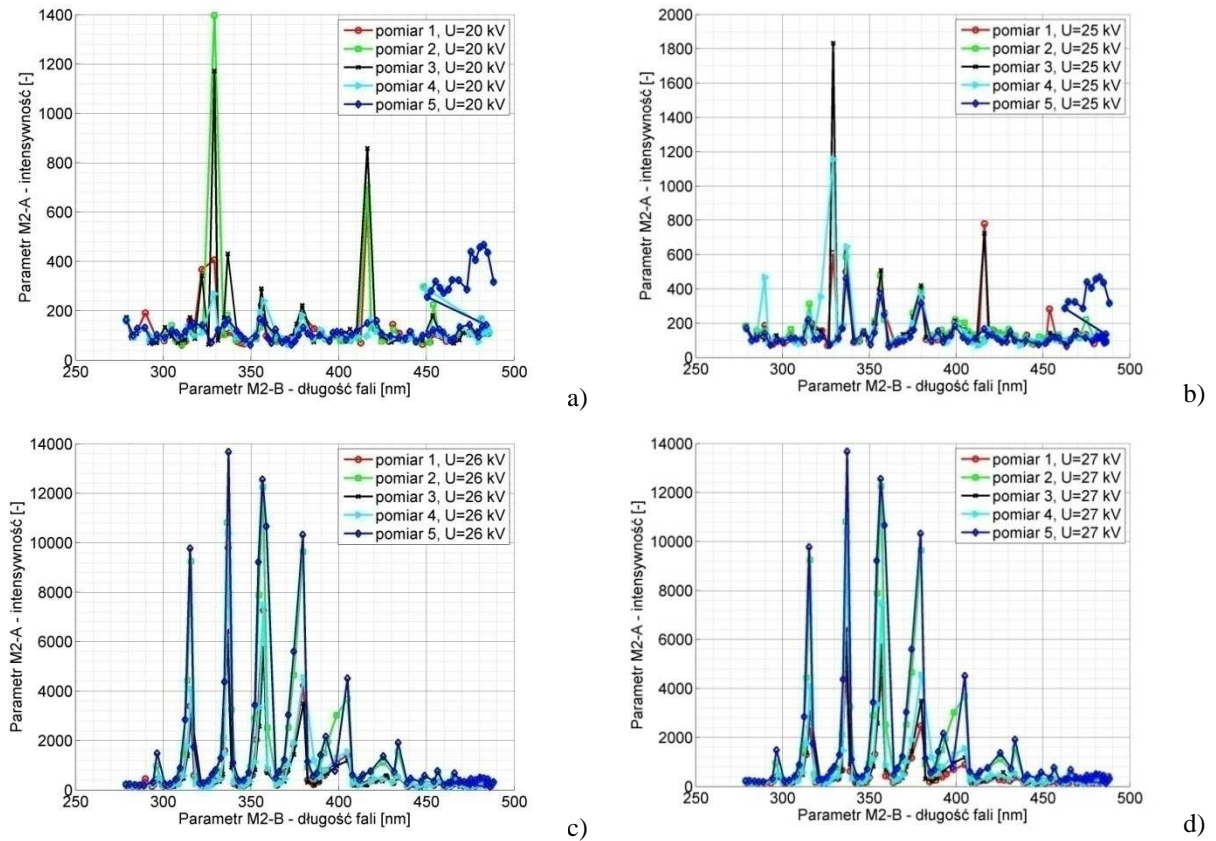
Rys. 4 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



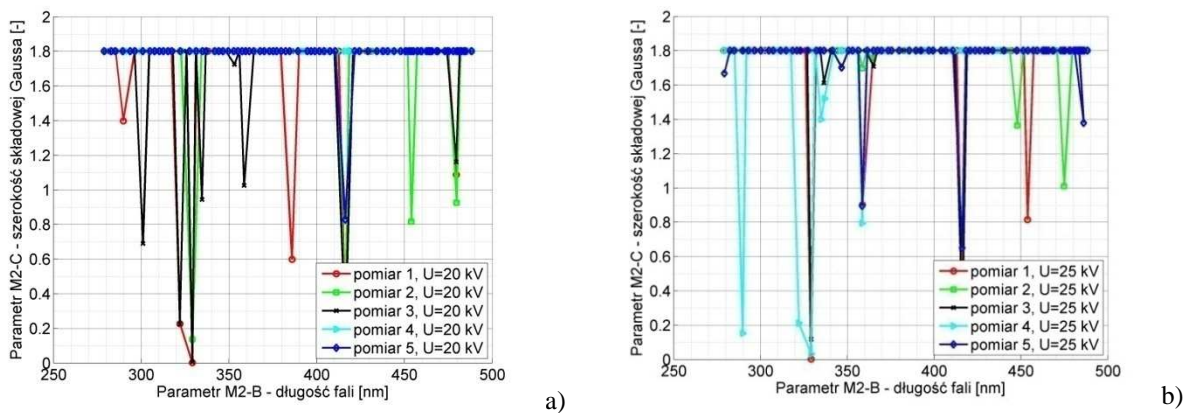
Rys. 5 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

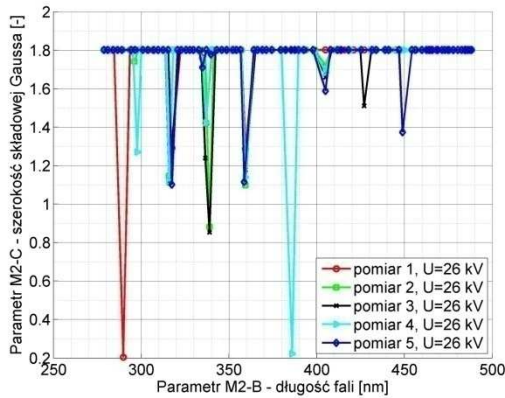
Na podstawie analizy wartości współczynników $RMSE$ i SSE , które osiągają wartości powyżej 100 stwierdzono brak możliwości zastosowania tego modelu do celów predykcyjnych.

Na rys. 6-7 przedstawiono wartości parametrów A względem B i parametrów C względem B, uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ.

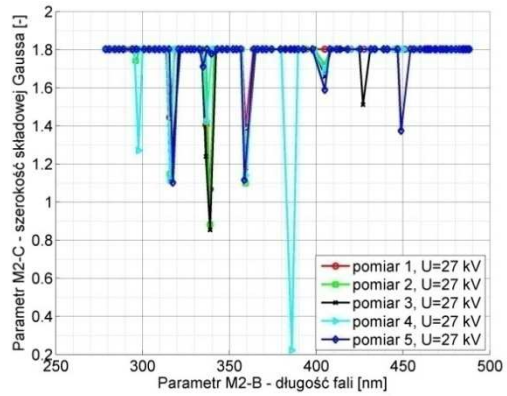


Rys. 6 Wartości parametrów A względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,72U_p = 20$ kV, b) $0,90U_p = 25$ kV, c) $0,94U_p = 26$ kV, d) $0,97U_p = 27$ kV.





c)

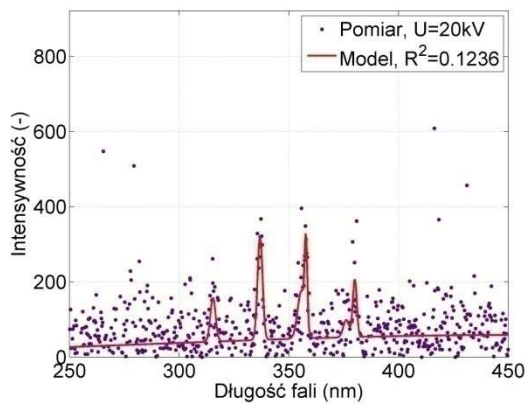


d)

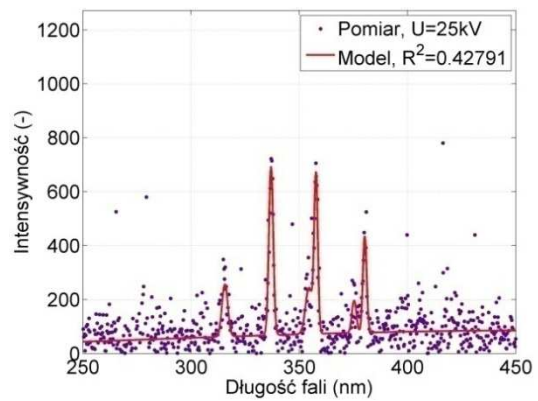
Rys. 7 Wartości parametrów C względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,72U_p=20$ kV, b) $0,90U_p=25$ kV, c) $0,94U_p=26$ kV, d) $0,97U_p=27$ kV.

1.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa

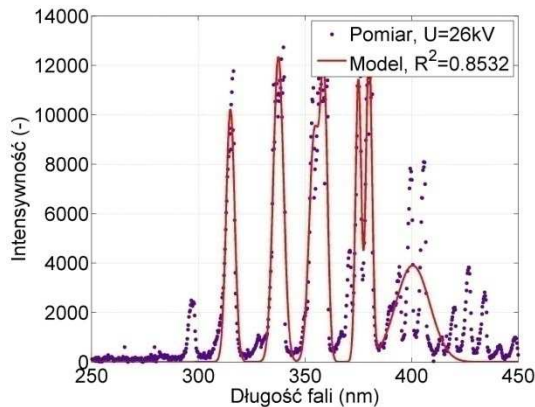
Na rys. 8 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (4.17 - model M1) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik modelowania, kolorem fioletowym - wynik pomiarów. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



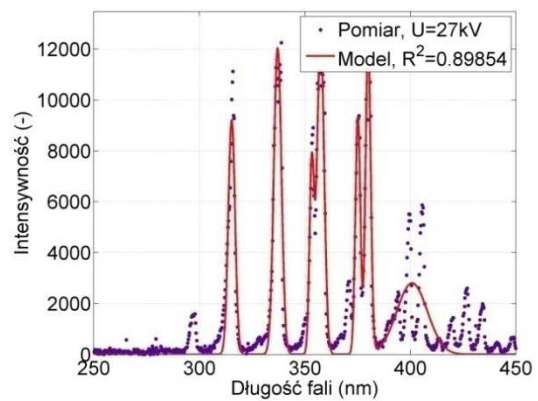
a)



b)



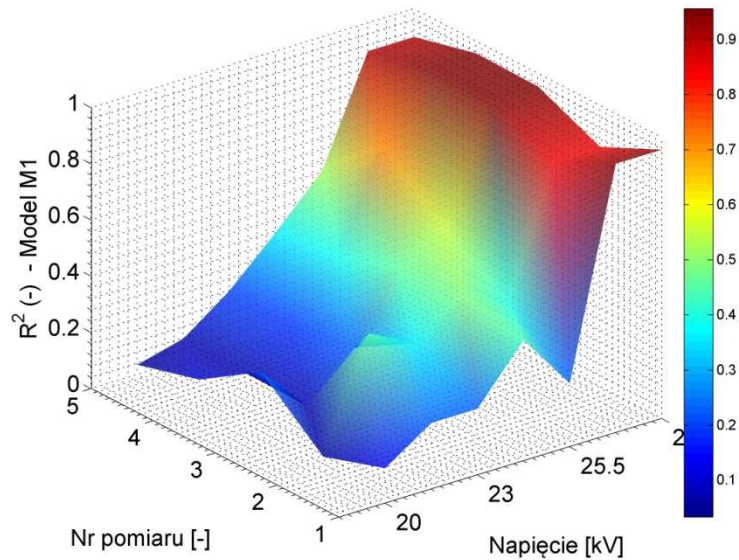
c)



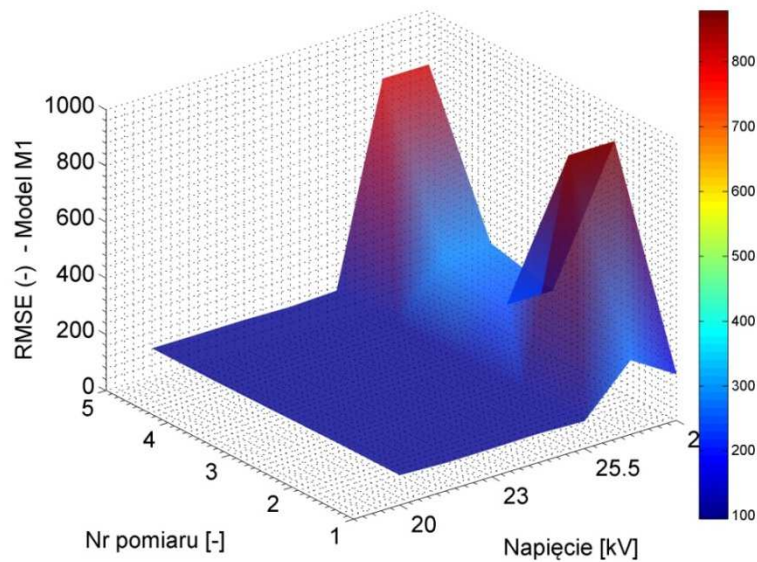
d)

Rys. 8 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,72U_p=20$ kV, b) $0,90U_p=25$ kV, c) $0,94U_p=26$ kV, d) $0,97U_p=27$ kV.

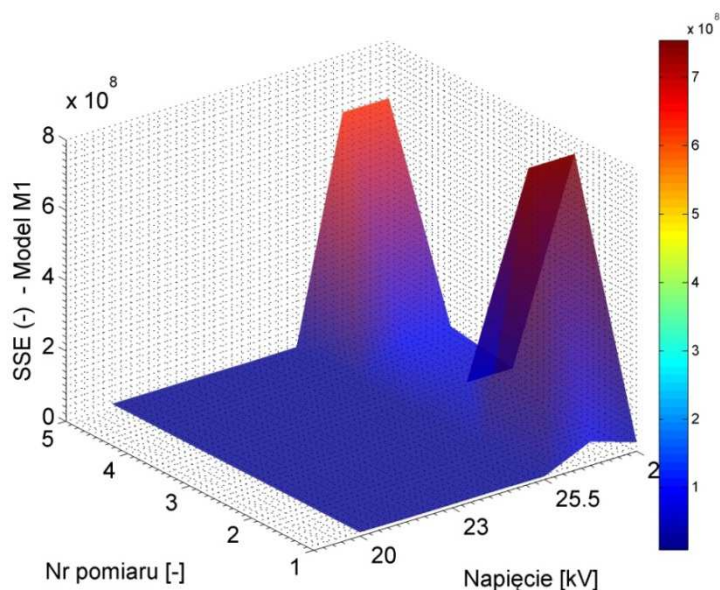
Na rys. 9-11 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (model M1), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.



Rys. 9 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

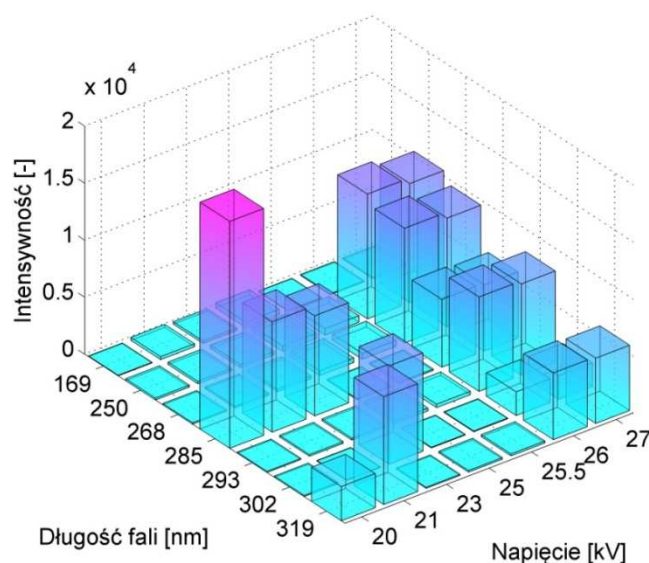


Rys. 10 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



Rys. 11 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M1 dla napięć przekraczających napięcie progowe uzyskuje doskonałe dopasowanie, o czym świadczą wartości bliskie jedności. Dla mniejszych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano dopasowanie umiarkowane, a dla najmniejszych napięć brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach. Zastosowanie modelu M1 pozwoliło na dokładne określenie intensywności i długości najbardziej dominujących fal świetlnych w rejestrowanym widmie emitowanym przez WNZ. Na rys. 12 przedstawiono intensywności poszczególnych długości fal w zależności od wartości napięcia zasilającego badany układ.

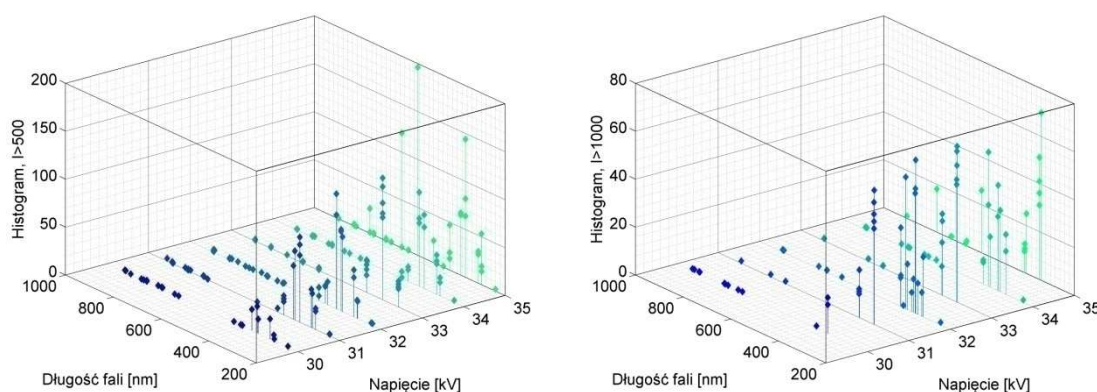


Rys. 12 Zależność intensywności poszczególnych składowych widma, uzyskanego w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M1, w funkcji napięcia generacji WNZ.

2. Odległość między elektrodami 7 cm

2.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych

Na rys. 13 przedstawiono zbiorcze zestawienie histogramów obliczonych dla widm o największych wartościach intensywności uzyskanych podczas pomiarów w funkcji napięcia generacji WNZ. Wykres po lewej dotyczy intensywności przekraczających wartość 500 ($I > 500$), wykres po prawej - intensywności przekraczających wartość 1000 ($I > 1000$). Na podstawie tej analizy możliwe jest określenie częstości występowania emisji świetlnej generowanej przez WNZ o danej długości fali.



Rys. 13 Zestawienie zbiorcze histogramów widm intensywności dla różnych wartości napięć. Po lewej: $I > 500$. Po prawej: $I > 1000$.

Na podstawie otrzymanych histogramów dla wartości intensywności przekraczających 1000 określono długości fal świetlnych pojawiających się w zarejestrowanych sygnałach, które zestawiono w tabelicy 2.

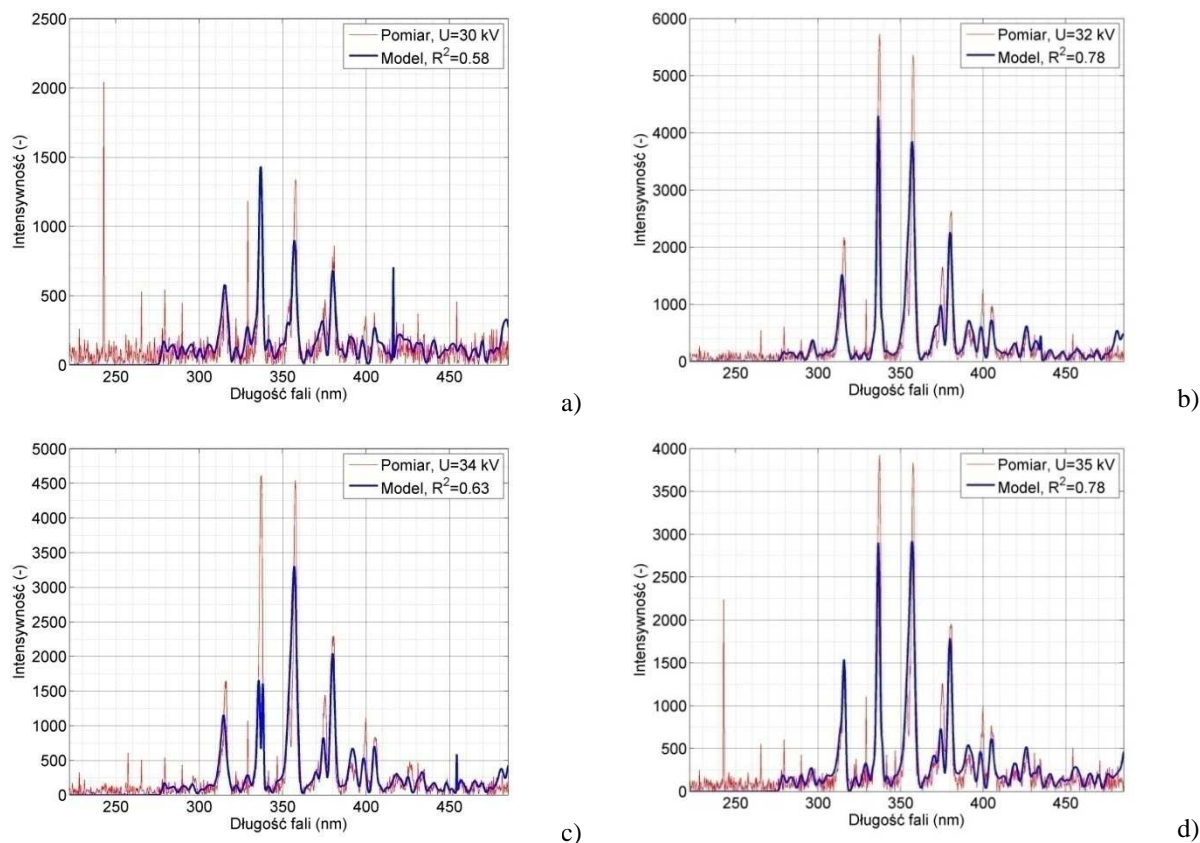
Tablica 2

Długości fal występujących w emisji świetlnej wykazującej wartość $I > 1000$.

Przedział długości fal [nm]	Wartości i przedziały długości dominujących fal występujące w emisji świetlnej wykazujące wartość intensywności $I > 1000$ [nm]
$\lambda = [200 - 299]$	203
$\lambda = [300 - 399]$	306-317, 335-339, 352-359, 374-382, 386, 393-394, 399
$\lambda = [400 - 499]$	400, 405-406, 423
$\lambda > 500$	587-594, 640, 672, 745, 766-768, 770-771, 793, 933

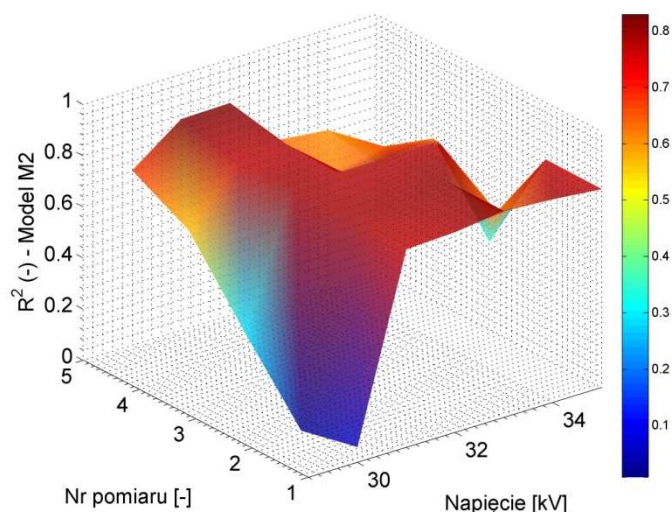
2.2 Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa

Na rys. 14 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem szeregu Gaussa (4.16 - model M2) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik pomiarów, kolorem niebieskim - wynik modelowania. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



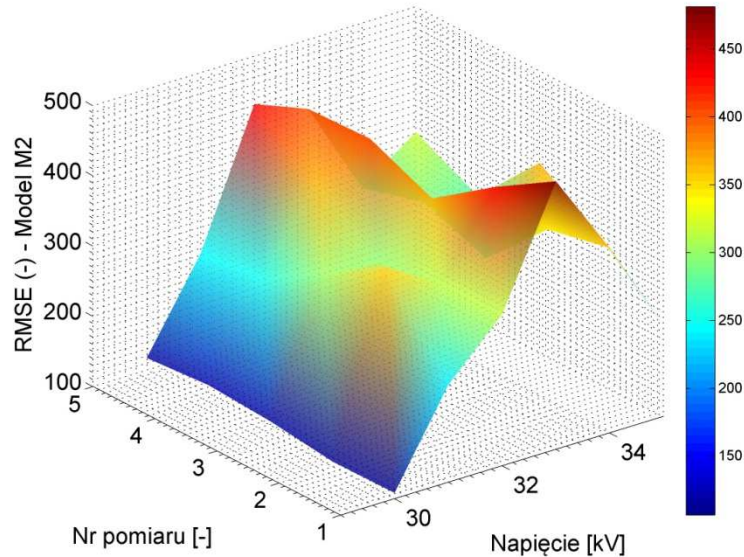
Rys. 14 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,78U_p=30$ kV; b) $0,84U_p=32$ kV; c) $0,89U_p=34$ kV; d) $0,91U_p=35$ kV.

Na rys. 15-17 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem szeregu Gaussa (model M2), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.

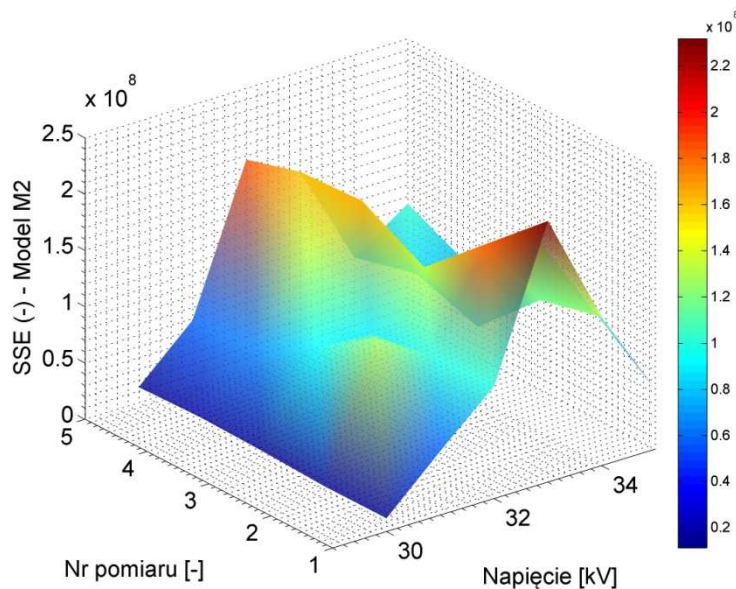


Rys. 15 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M2 w przeważającej większości przypadków uzyskuje bardzo dobre dopasowanie, o czym świadczą wartości przekraczające 0.6. Jedynie dla najmniejszych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano pojedyncze przypadki braku dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach.



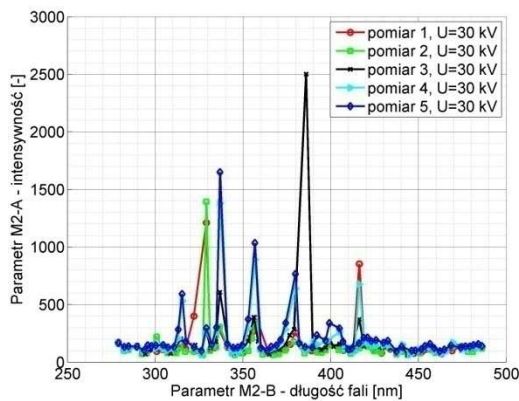
Rys. 16 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



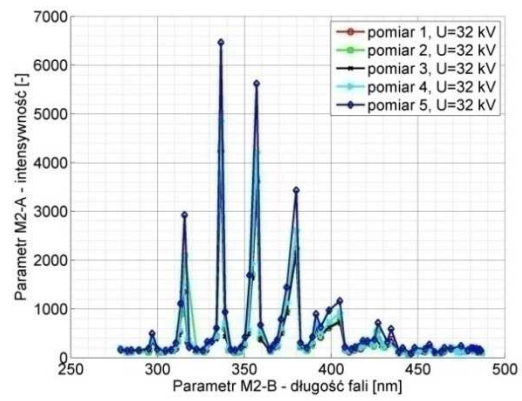
Rys. 17 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynników $RMSE$ i SSE , które osiągają wartości powyżej 100 stwierdzono brak możliwości zastosowania tego modelu do celów predykcyjnych.

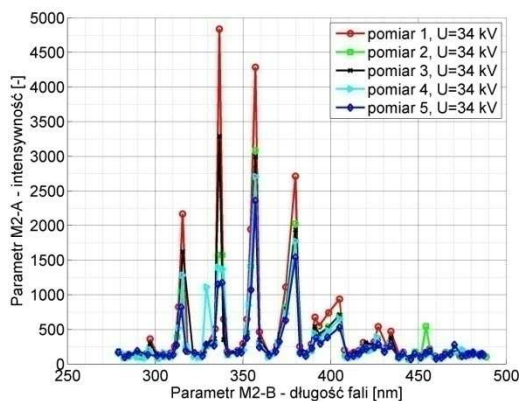
Na rys. 18-19 przedstawiono wartości parametrów A względem B i parametrów C względem B, uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ.



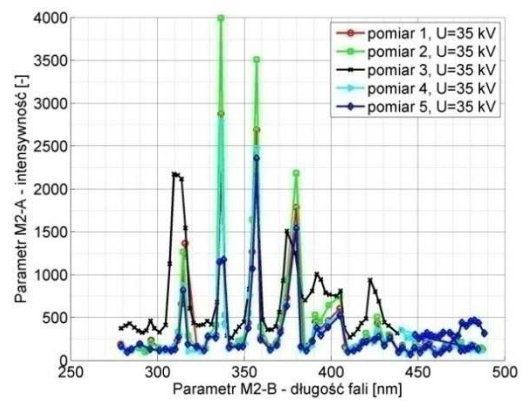
a)



b)

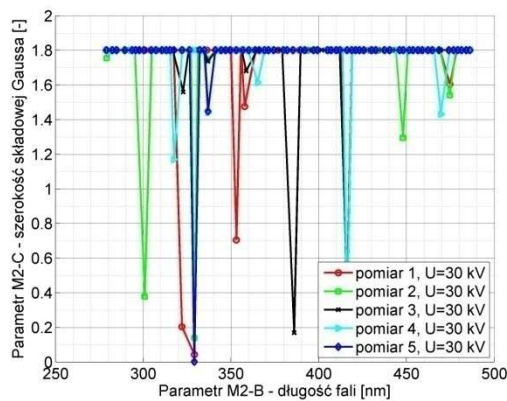


c)

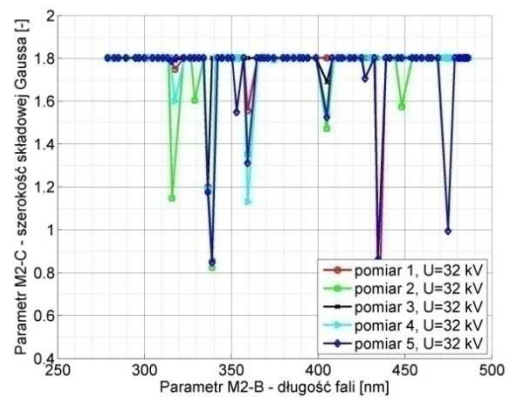


d)

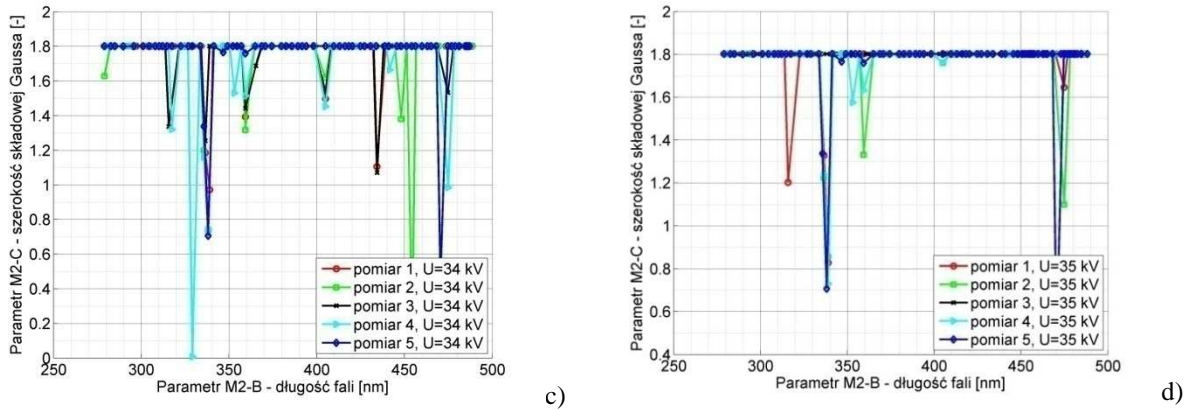
Rys. 18 Wartości parametrów A względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,78U_p=30$ kV; b) $0,84U_p=32$ kV; c) $0,89U_p=34$ kV; d) $0,91U_p=35$ kV.



a)



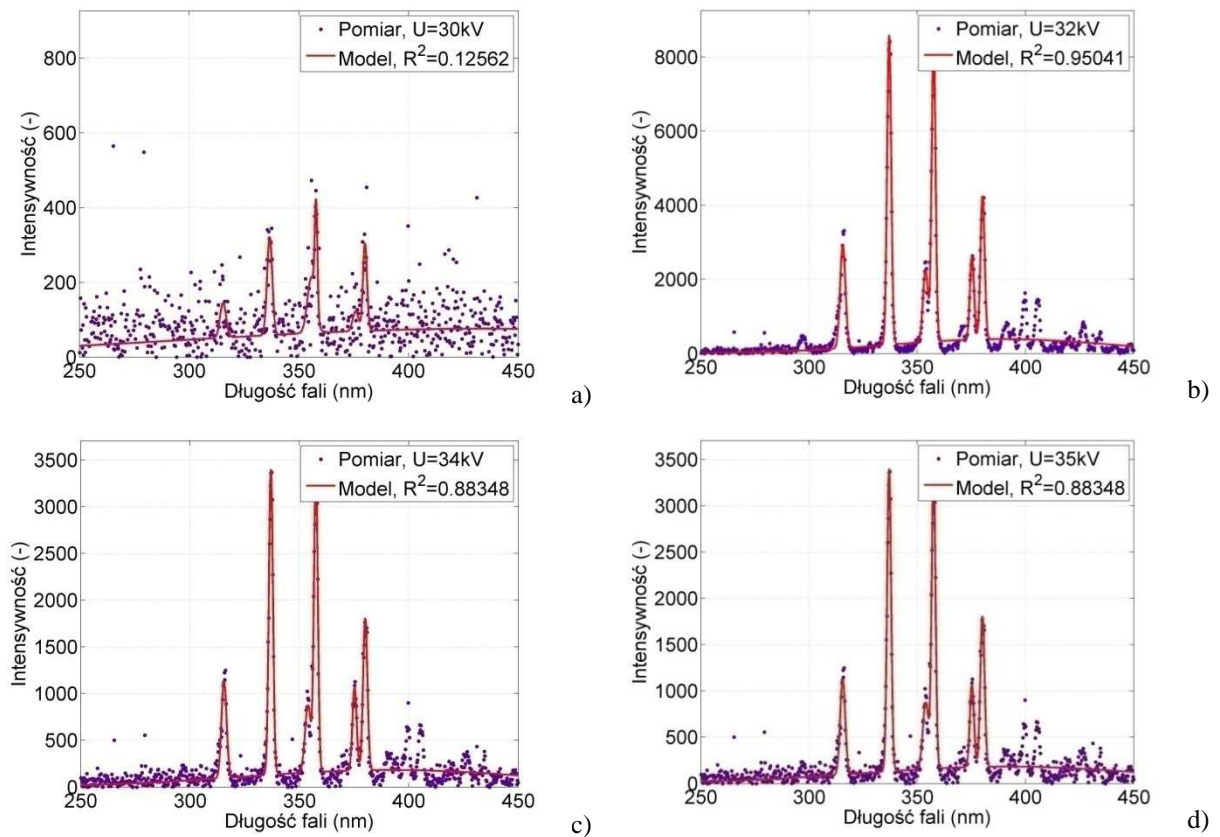
b)



Rys. 19 Wartości parametrów C względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,78U_p=30$ kV; b) $0,84U_p=32$ kV; c) $0,89U_p=34$ kV; d) $0,91U_p=35$ kV.

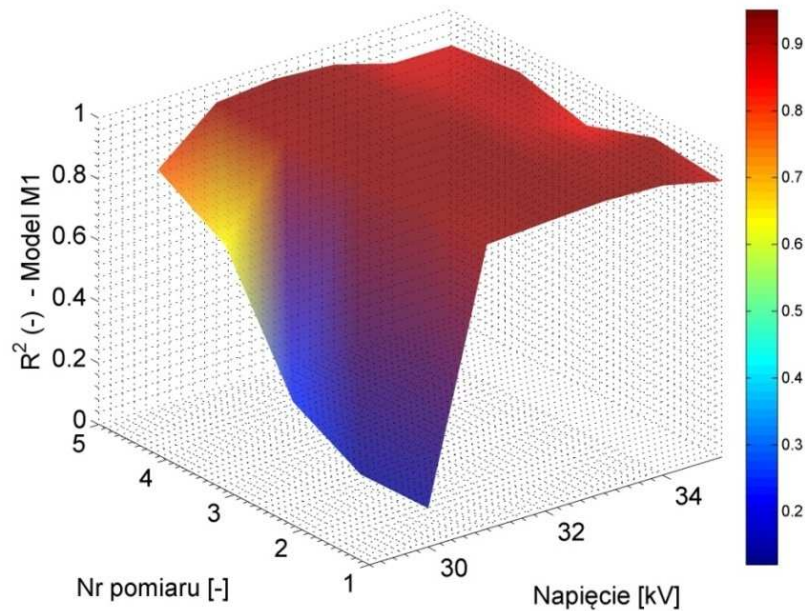
2.3. Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa

Na rys. 20 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (4.17 - model M1) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik modelowania, kolorem fioletowym - wynik pomiarów. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).

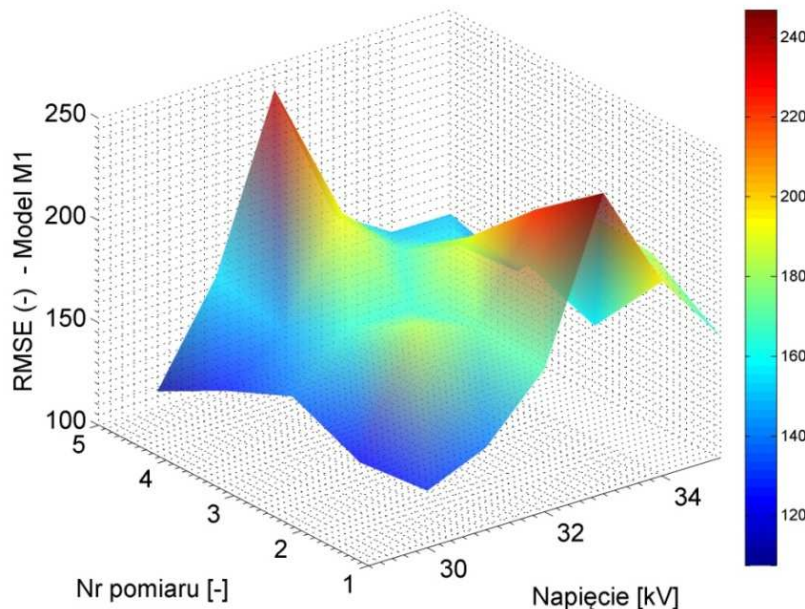


Rys. 20 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,78U_p=30$ kV; b) $0,84U_p=32$ kV; c) $0,89U_p=34$ kV; d) $0,91U_p=35$ kV.

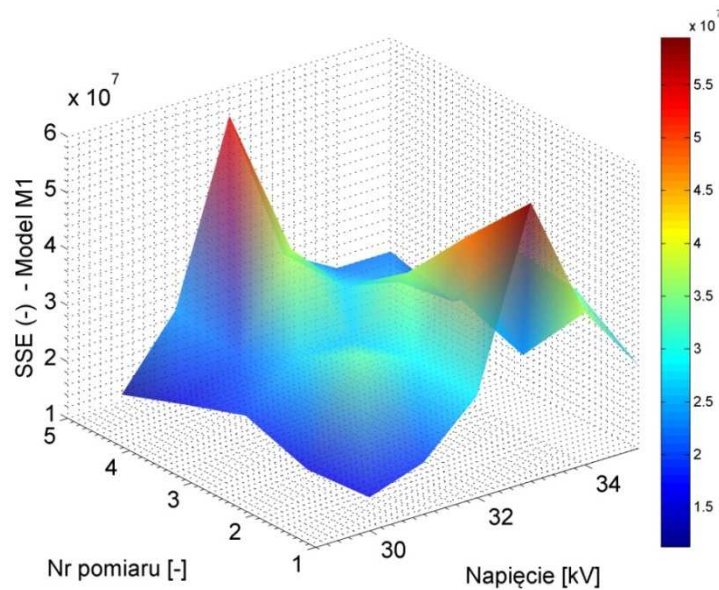
Na rys. 21-23 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (model M1), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.



Rys. 21 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

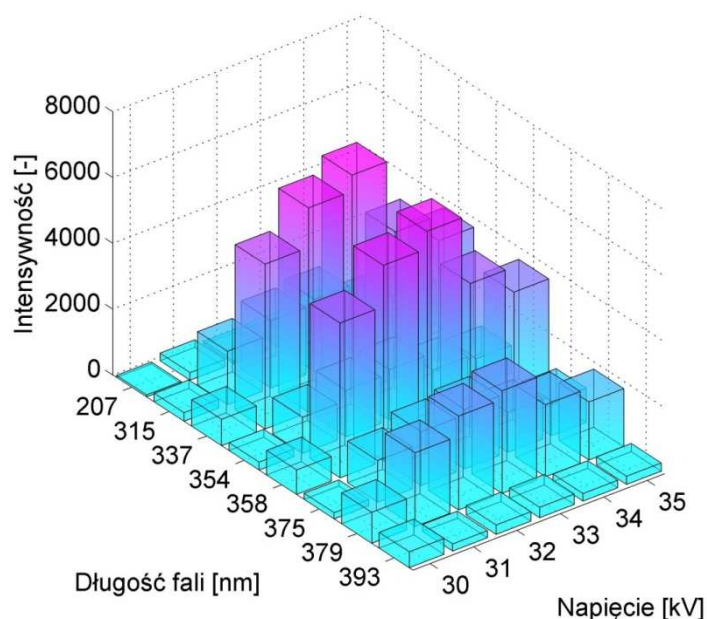


Rys. 22 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



Rys. 23 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M1 w przeważającej większości przypadków uzyskuje doskonałe dopasowanie, o czym świadczą wartości bliskie jedności. Jedynie dla najmniejszych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach. Zastosowanie modelu M1 pozwoliło na dokładne określenie intensywności i długości najbardziej dominujących fal świetlnych w rejestrowanym widmie emitowanym przez WNZ. Na rys. 24 przedstawiono intensywności poszczególnych długości fal w zależności od wartości napięcia zasilającego badany układ.

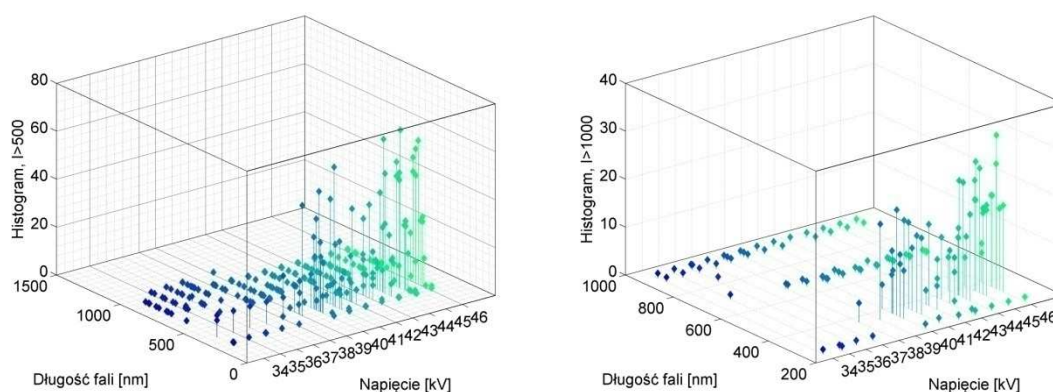


Rys. 24 Zależność intensywności poszczególnych składowych widma, uzyskanego w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M1, w funkcji napięcia generacji WNZ.

3. Odległość między elektrodami 9 cm

3.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych

Na rys. 25 przedstawiono zbiorcze zestawienie histogramów obliczonych dla widm o największych wartościach intensywności uzyskanych podczas pomiarów w funkcji napięcia generacji WNZ. Wykres po lewej dotyczy intensywności przekraczających wartość 500 ($I > 500$), wykres po prawej - intensywności przekraczających wartość 1000 ($I > 1000$). Na podstawie tej analizy możliwe jest określenie częstości występowania emisji świetlnej generowanej przez WNZ o danej długości fali.



Rys. 25 Zestawienie zbiorcze histogramów widm intensywności dla różnych wartości napięć. Po lewej: $I > 500$. Po prawej: $I > 1000$.

Na podstawie otrzymanych histogramów dla wartości intensywności przekraczających 1000 określono długości fal świetlnych pojawiających się w zarejestrowanych sygnałach, które zestawiono w tabelicy 3.

Tablica 3

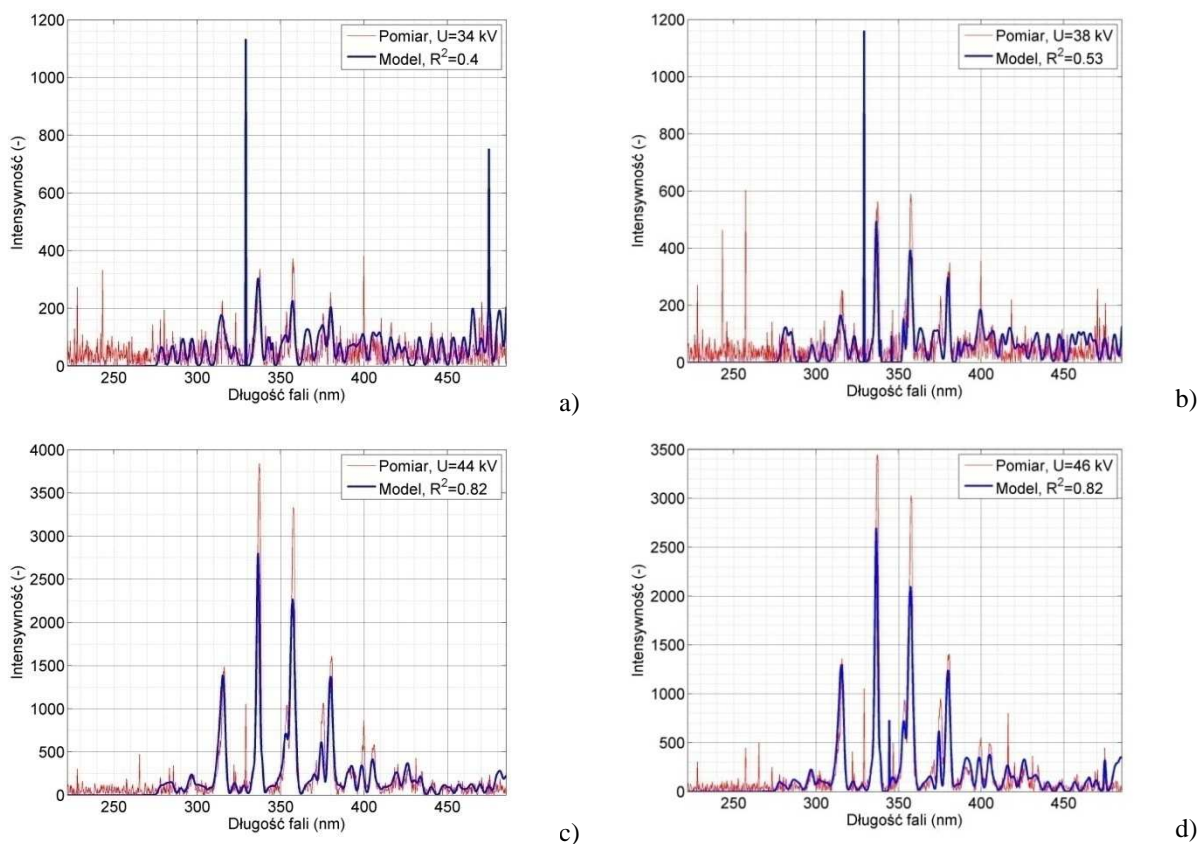
Długości fal występujących w emisji świetlnej wykazującej wartość $I > 1000$.

Przedział długości fal [nm]	Wartości i przedziały długości dominujących fal występujące w emisji świetlnej wykazujące wartość intensywności $I > 1000$ [nm]
$\lambda = [200 - 299]$ nm	203
$\lambda = [300 - 399]$ nm	315-317, 336-338, 354, 356-359, 375-376, 379-381
$\lambda = [400 - 499]$ nm	-
$\lambda > 500$ nm	660, 724, 813, 933

3.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa

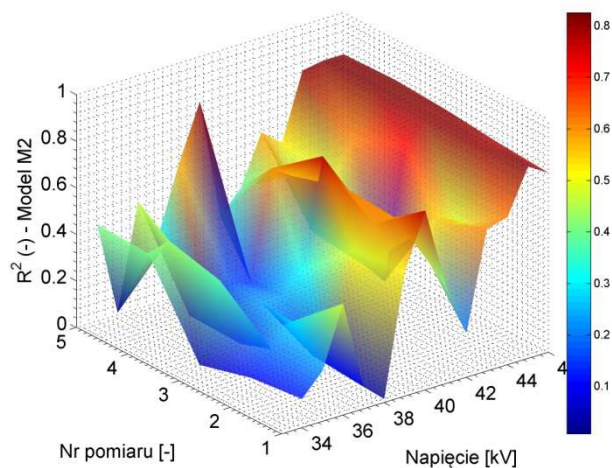
Na rys. 26 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem szeregu Gaussa (4.16 - model M2) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik pomiarów, kolorem niebieskim - wynik modelowania.

W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



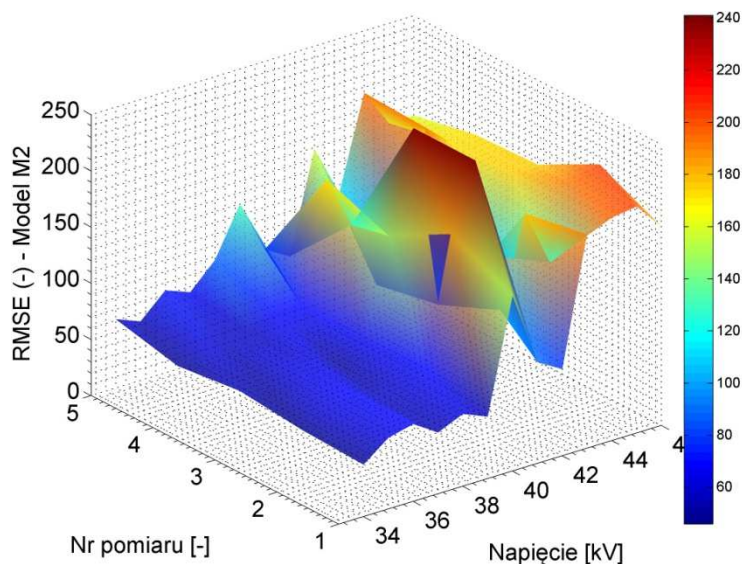
Rys. 26 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,67U_p=34$ kV; b) $0,75U_p=38$ kV; c) $0,87U_p=44$ kV; d) $0,95U_p=48$ kV.

Na rys. 27-29 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem szeregu Gaussa (model M2), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.

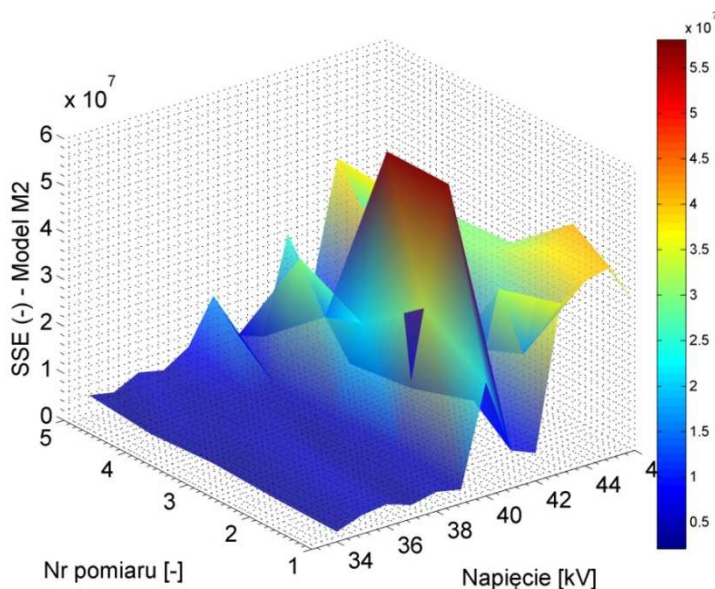


Rys. 27 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M2 w przeważającej większości przypadków uzyskuje doskonałe dopasowanie, o czym świadczą wartości bliskie jedności. Jedynie dla najmniejszych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach.



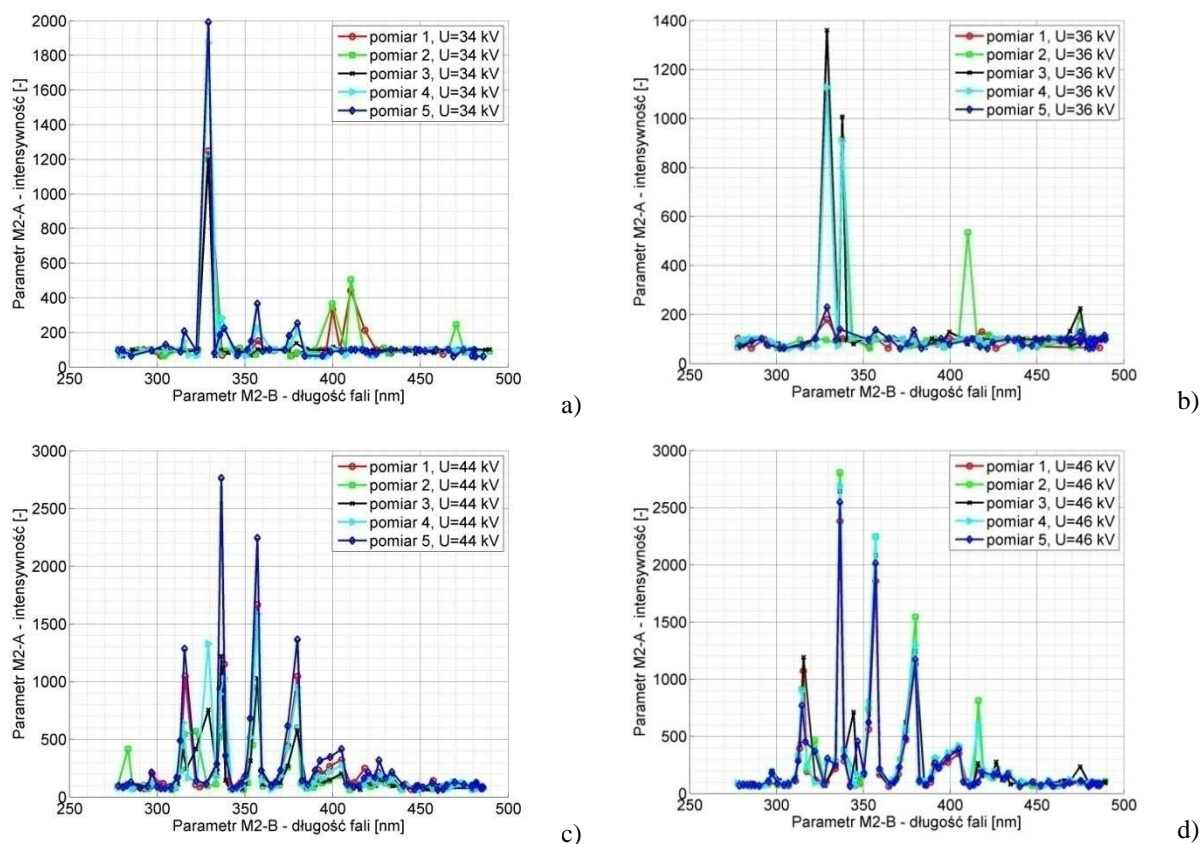
Rys. 28 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



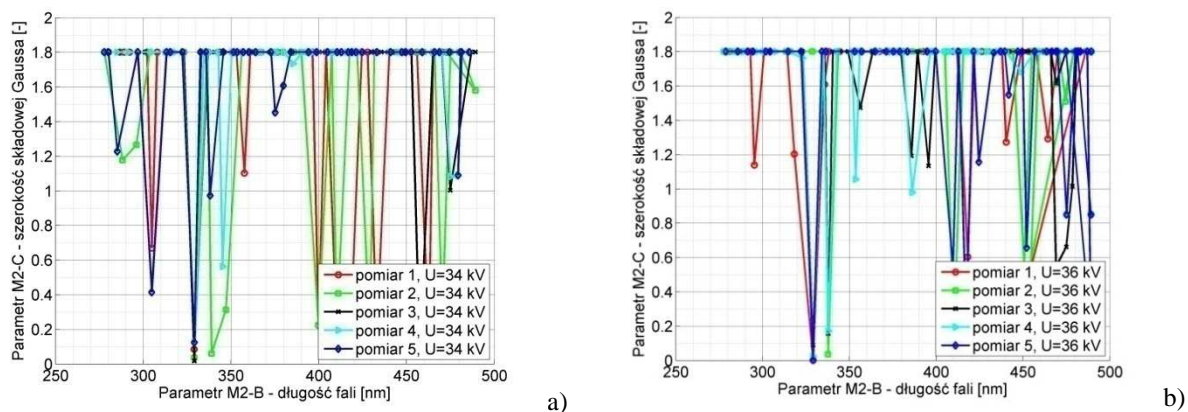
Rys. 29 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

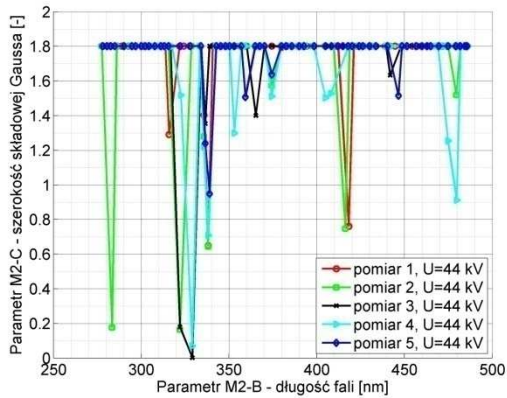
Na podstawie analizy wartości współczynników $RMSE$ i SSE , które osiągają wartości powyżej 100 stwierdzono brak możliwości zastosowania tego modelu do celów predykcyjnych.

Na rys. 30-31 przedstawiono wartości parametrów A względem B i parametrów C względem B, uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ.

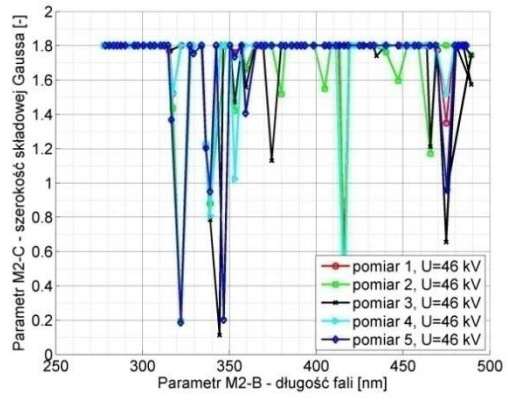


Rys. 30 Wartości parametrów A względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,67U_p=34$ kV; b) $0,75U_p=38$ kV; c) $0,87U_p=44$ kV; d) $0,95U_p=48$ kV.





c)

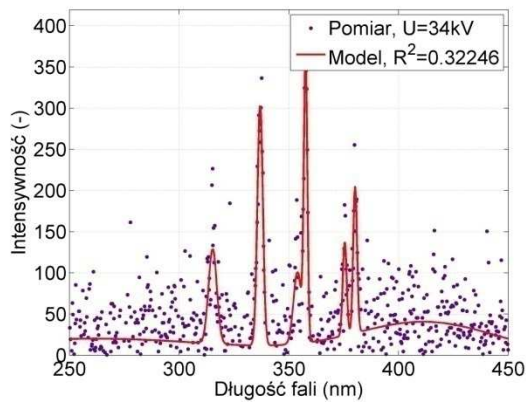


d)

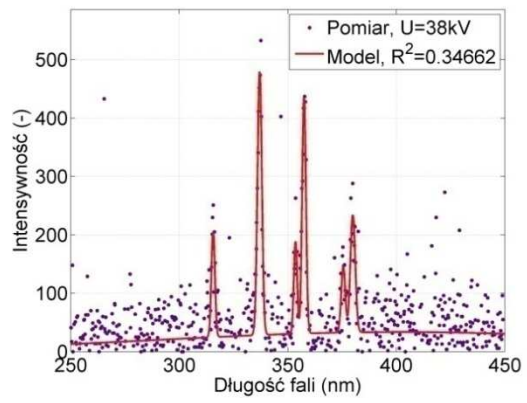
Rys. 31 Wartości parametrów C względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,67U_p=34$ kV; b) $0,75U_p=38$ kV; c) $0,87U_p=44$ kV; d) $0,95U_p=48$ kV.

3.3 Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa

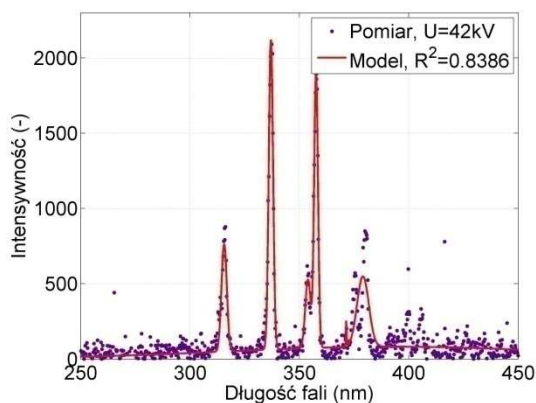
Na rys. 32 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (4.17 - model M1) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik modelowania, kolorem fioletowym - wynik pomiarów. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



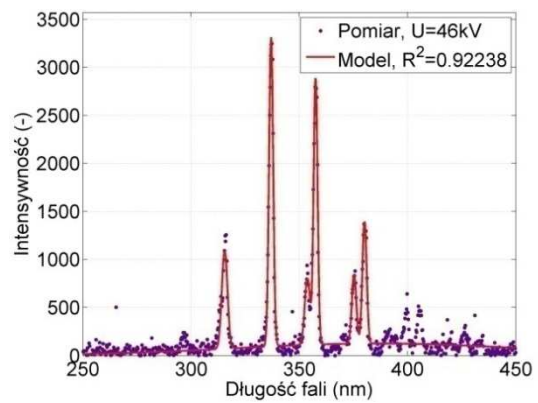
a)



b)



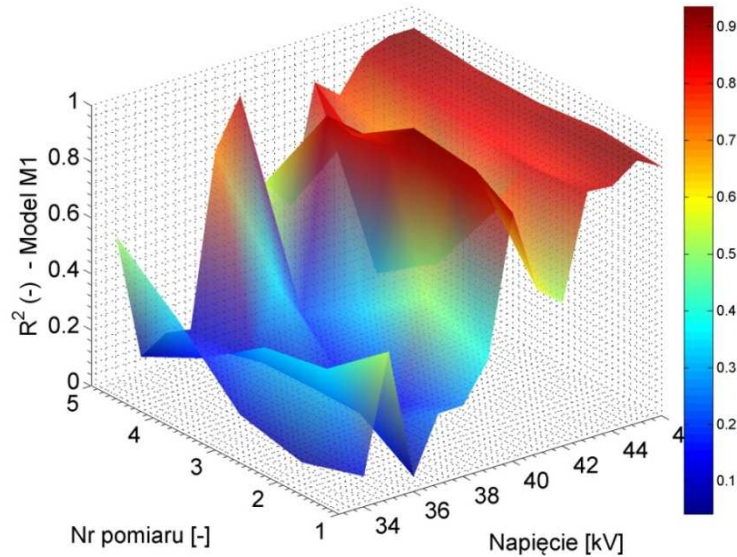
c)



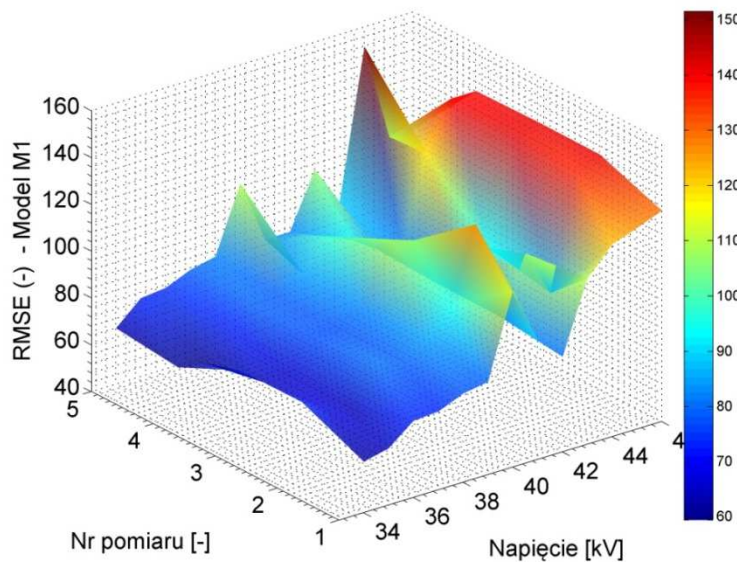
d)

Rys. 32 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,67U_p=34$ kV; b) $0,75U_p=38$ kV; c) $0,87U_p=44$ kV; d) $0,95U_p=48$ kV.

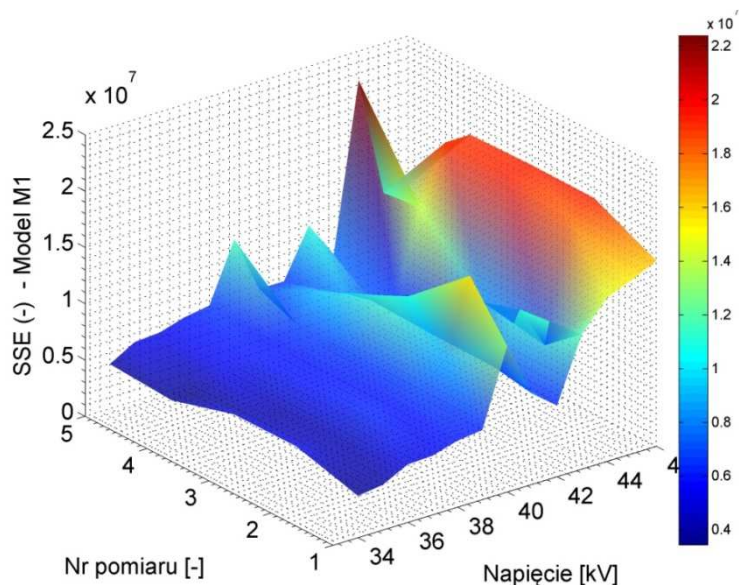
Na rys. 33-35 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (model M1), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.



Rys. 33 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

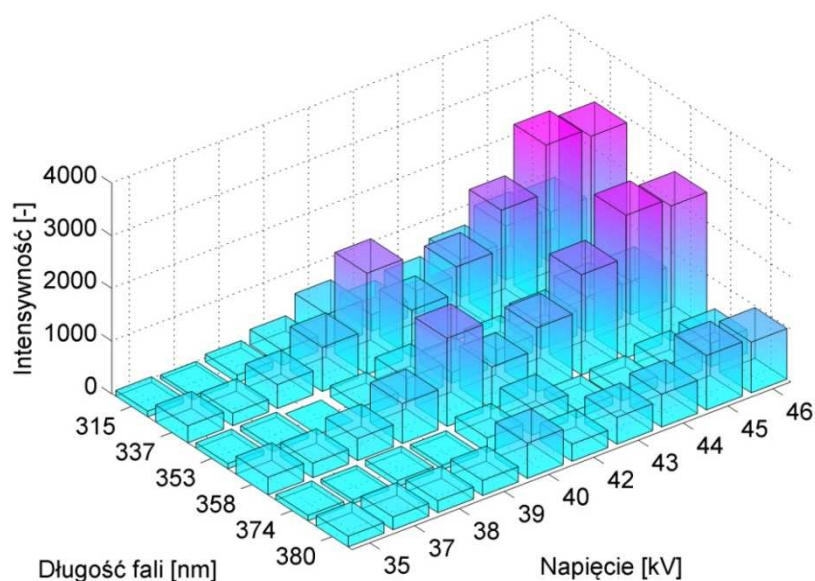


Rys. 34 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



Rys. 35 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M1 w przeważającej większości przypadków uzyskuje bardzo dobre i dobre dopasowanie, o czym świadczą wartości powyżej 0,6. Jedynie dla niektórych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach. Zastosowanie modelu M1 pozwoliło na dokładne określenie intensywności i długości najbardziej dominujących fal świetlnych w rejestrowanym widmie emitowanym przez WNZ. Na rys. 36 przedstawiono intensywności poszczególnych długości fal w zależności od wartości napięcia zasilającego badany układ.

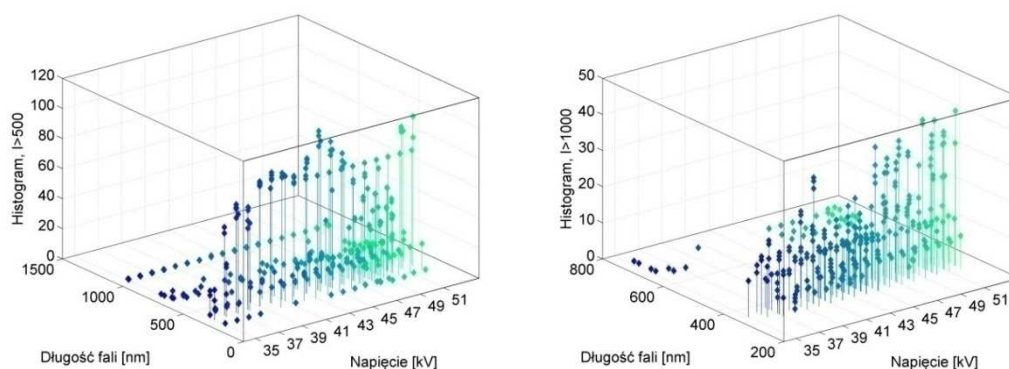


Rys. 36 Zależność intensywności poszczególnych składowych widma, uzyskanego w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M1, w funkcji napięcia generacji WNZ.

4. Odległość między elektrodami 11 cm

4.1. Analiza zarejestrowanych danych empirycznych

Na rys. 37 przedstawiono zbiorcze zestawienie histogramów obliczonych dla widm o największych wartościach intensywności uzyskanych podczas pomiarów w funkcji napięcia generacji WNZ. Wykres po lewej dotyczy intensywności przekraczających wartość 500 ($I > 500$), wykres po prawej - intensywności przekraczających wartość 1000 ($I > 1000$). Na podstawie tej analizy możliwe jest określenie częstości występowania emisji świetlnej generowanej przez WNZ o danej długości fali.



Rys. 37 Zestawienie zbiorcze histogramów widm intensywności dla różnych wartości napięć. Po lewej: $I > 500$. Po prawej: $I > 1000$.

Na podstawie otrzymanych histogramów dla wartości intensywności przekraczających 1000 określono długości fal świetlnych pojawiających się w zarejestrowanych sygnałach, które zestawiono w tabelicy 4.

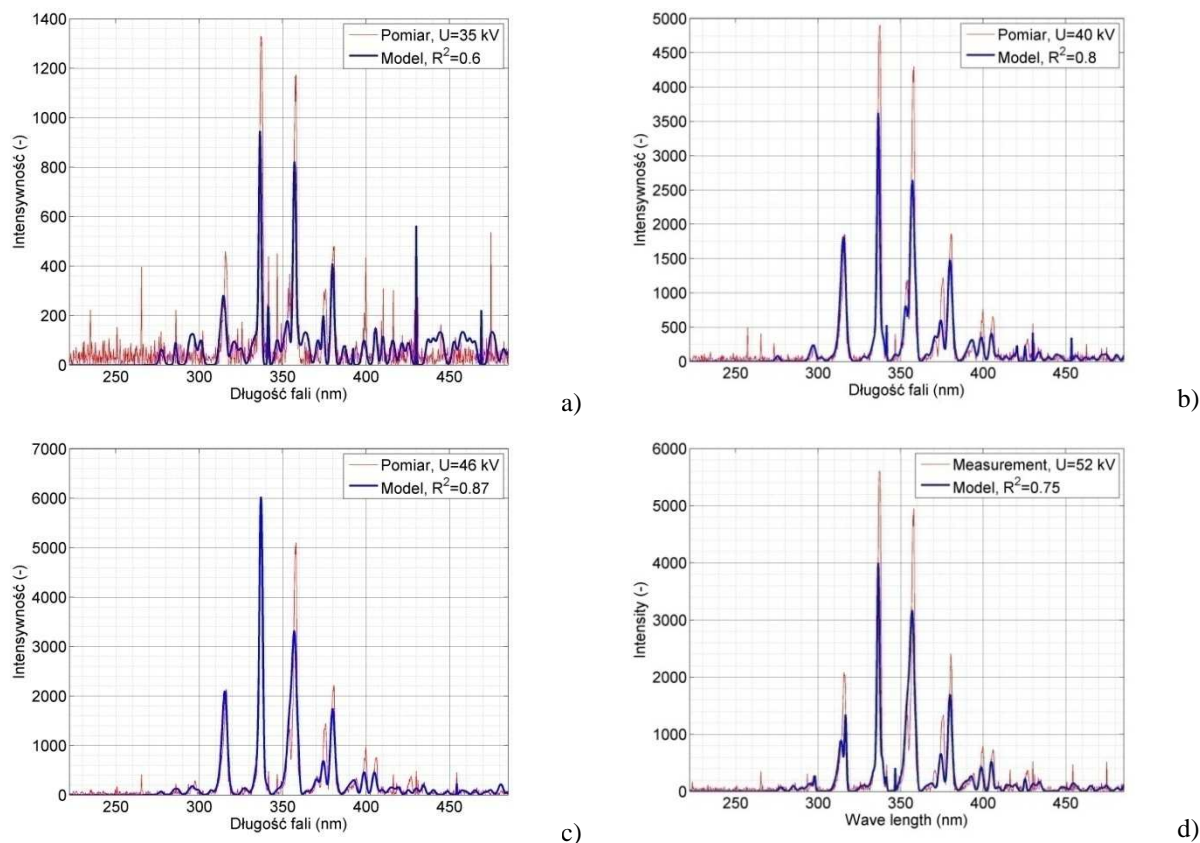
Tablica 4

Długości fal występujących w emisji świetlnej wykazującej wartość $I > 1000$.

Przedział długości fal [nm]	Wartości i przedziały długości dominujących fal występujące w emisji świetlnej wykazujące wartość intensywności $I > 1000$ [nm]
$\lambda = [200 - 299]$ nm	-
$\lambda = [300 - 399]$ nm	313-317, 335-339, 353-359, 374-377, 379-382, 399
$\lambda = [400 - 499]$ nm	400, 406
$\lambda > 500$ nm	660, 724, 739

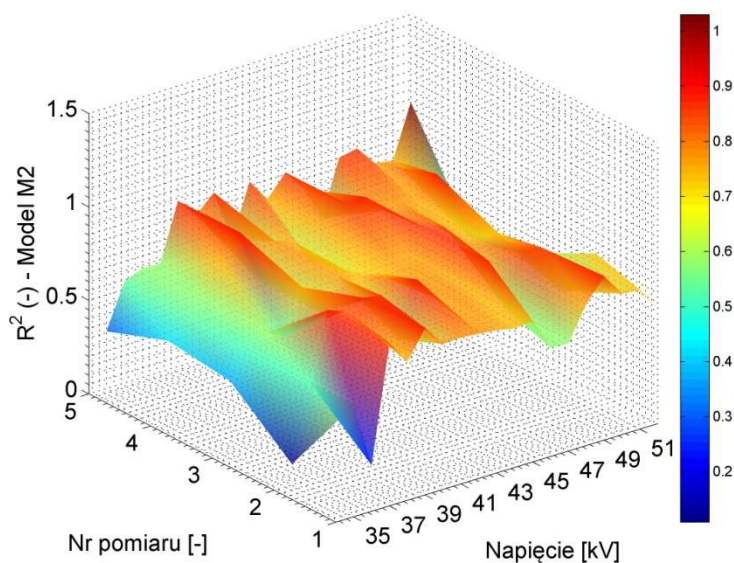
4.2. Analiza wyników regresji dla szeregu Gaussa

Na rys. 38 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem szeregu Gaussa (4.16 - model M2) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik pomiarów, kolorem niebieskim - wynik modelowania. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



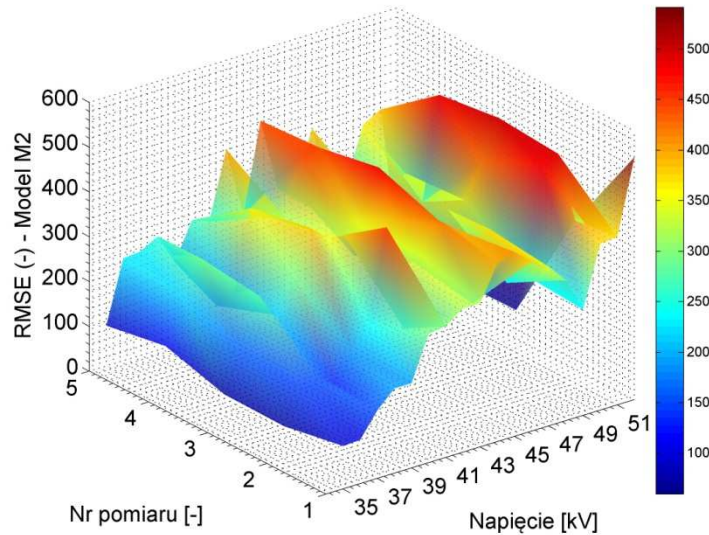
Rys. 38 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,58U_p=35\text{kV}$; b) $0,66U_p=40\text{kV}$; c) $0,76U_p=46\text{kV}$; d) $0,85U_p=52\text{kV}$.

Na rys. 39-41 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem szeregu Gaussa (model M2), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.

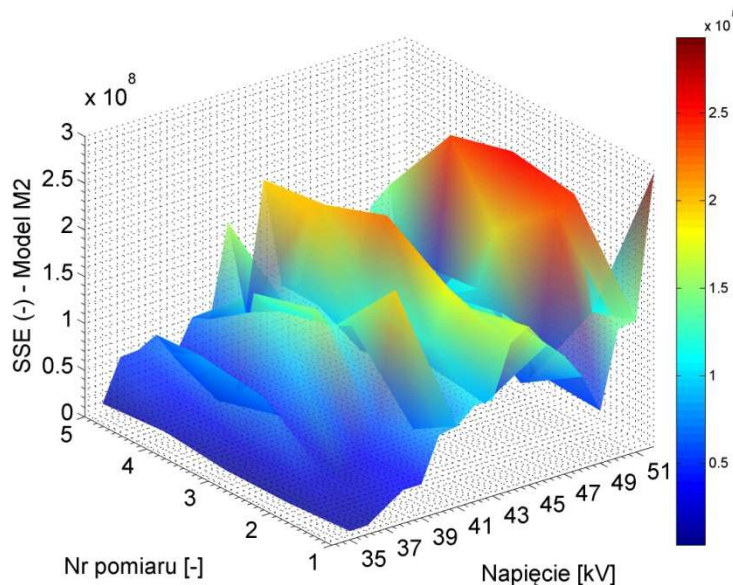


Rys. 39 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M2 w przeważającej większości przypadków uzyskuje dobre i bardzo dobre dopasowanie, o czym świadczą wartości powyżej 0,6. Jedynie dla pojedynczych napięć generacji WNZ uzyskano brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach.



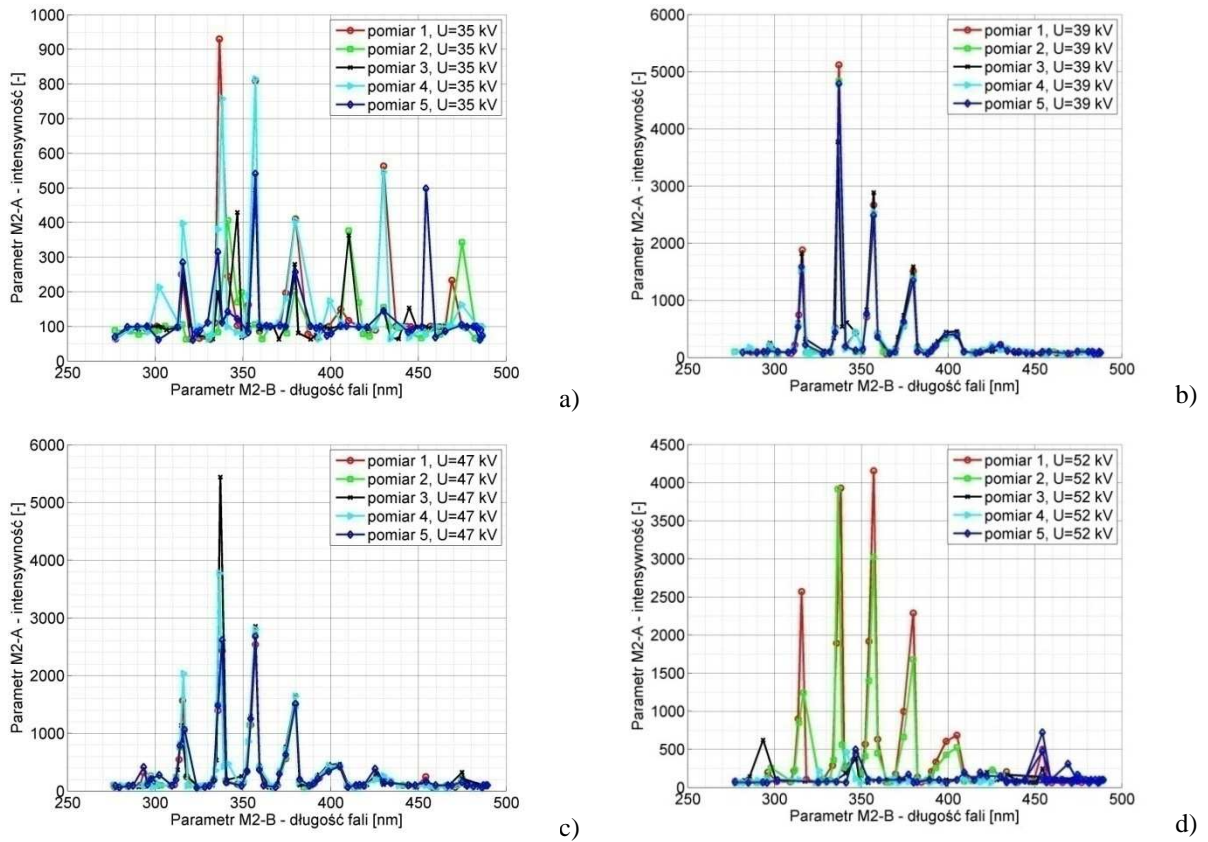
Rys. 40 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



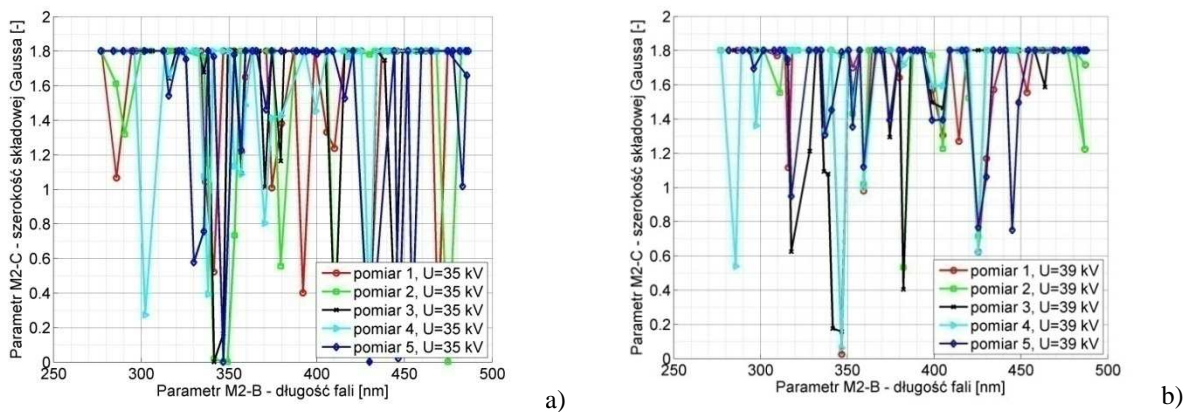
Rys. 41 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M2 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

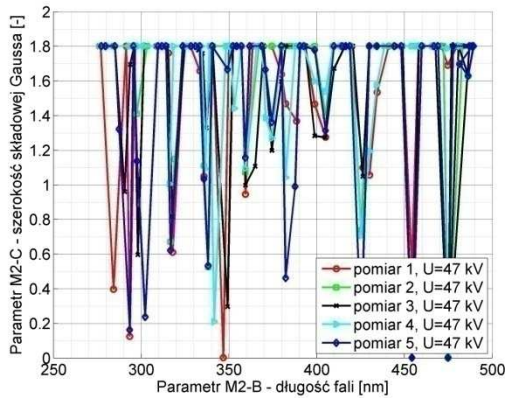
Na podstawie analizy wartości współczynników $RMSE$ i SSE , które osiągają wartości powyżej 100 stwierdzono brak możliwości zastosowania tego modelu do celów predykcyjnych.

Na rys. 42-43 przedstawiono wartości parametrów A względem B i parametrów C względem B, uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ.

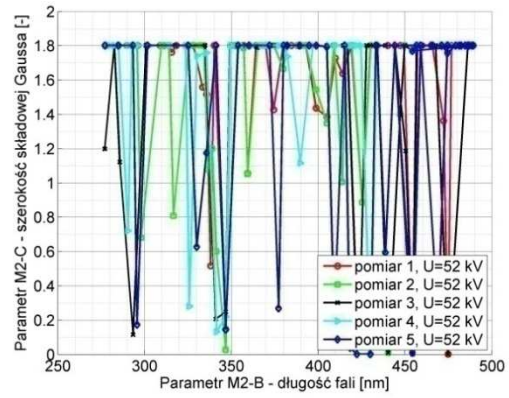


Rys. 42 Wartości parametrów A względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,58U_p=35\text{kV}$; b) $0,64U_p=39\text{kV}$; c) $0,77U_p=47\text{kV}$; d) $0,85U_p=52\text{kV}$.





c)

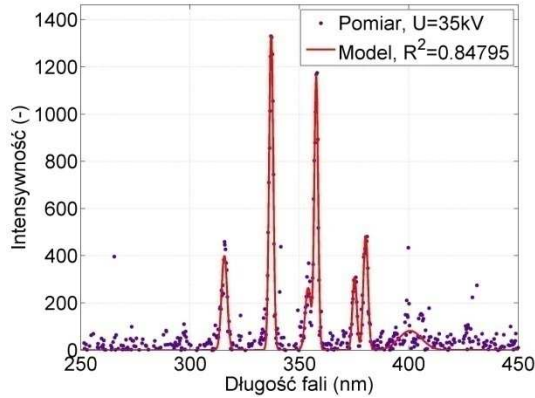


d)

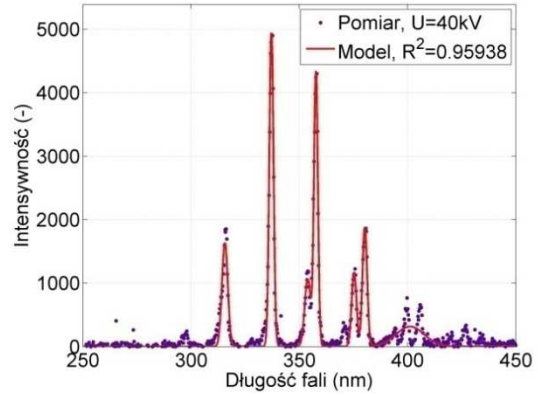
Rys. 43 Wartości parametrów C względem B uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M2 dla wybranych wartości napięcia generacji WNZ: a) $0,58U_p=35\text{kV}$; b) $0,64U_p=39\text{kV}$; c) $0,77U_p=47\text{kV}$; d) $0,85U_p=52\text{kV}$.

4.3 Analiza wyników regresji dla sumy ośmiu funkcji Gaussa

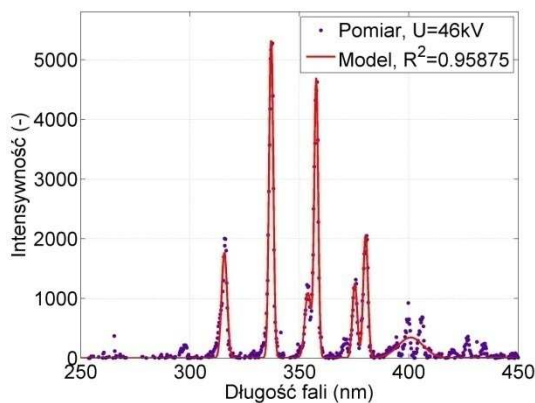
Na rys. 44 przedstawiono wyniki modelowania widm intensywności z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (4.17 - model M1) dla wybranych wartości napięć generacji WNZ. Kolorem czerwonym zaznaczono wynik modelowania, kolorem fioletowym - wynik pomiarów. W legendzie znajduje się wartość współczynnika determinacji R^2 obliczonego na podstawie równania (4.5).



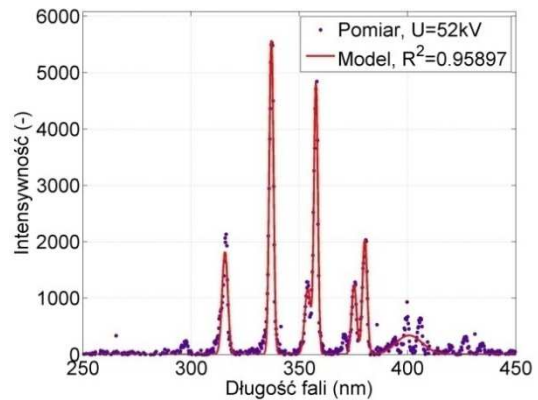
a)



b)



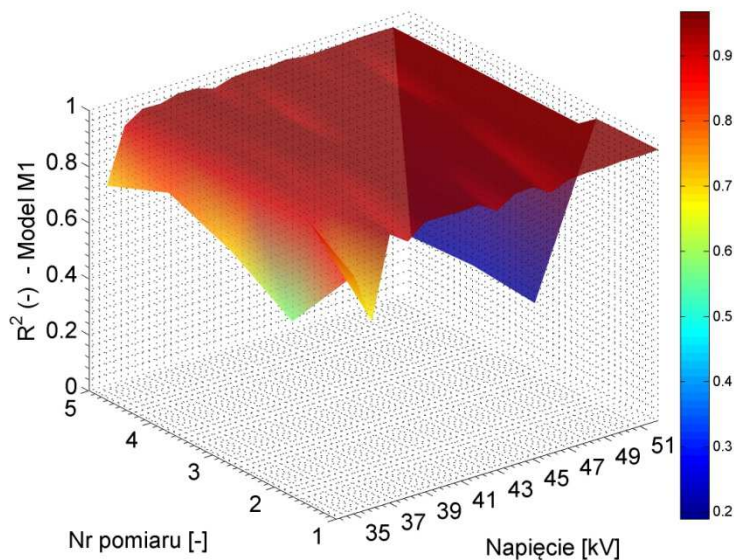
c)



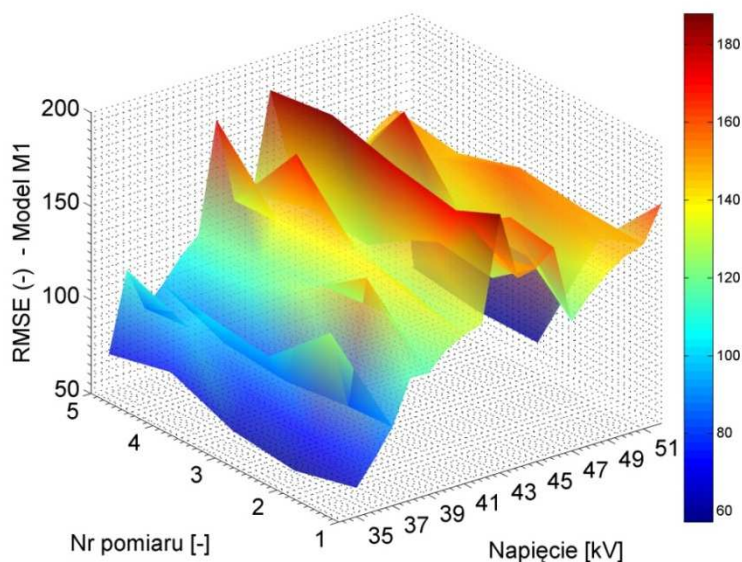
d)

Rys. 44 Widmo intensywności zarejestrowanej i zamodelowanej emisji świetlnej dla wybranych wartości napięć generacji WNZ: a) $0,58U_p=35\text{kV}$; b) $0,66U_p=40\text{kV}$; c) $0,76U_p=46\text{kV}$; d) $0,85U_p=52\text{kV}$.

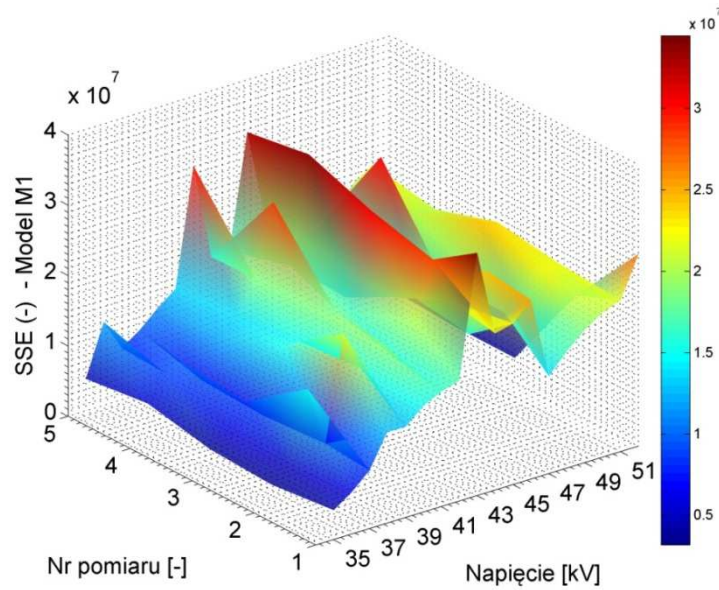
Na rys. 45-47 przedstawiono w sposób graficzny wartości parametrów dopasowania R^2 , $RMSE$ i SSE , obliczonych ze wzorów (4.10-12), uzyskane w procesie regresji z wykorzystaniem sumy ośmiu funkcji Gaussa (model M1), dla danych zarejestrowanych we wszystkich pięciu pomiarach przeprowadzonych przy różnych wartościach napięcia generacji WNZ.



Rys. 45 Zestawienie wartości współczynnika R^2 uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

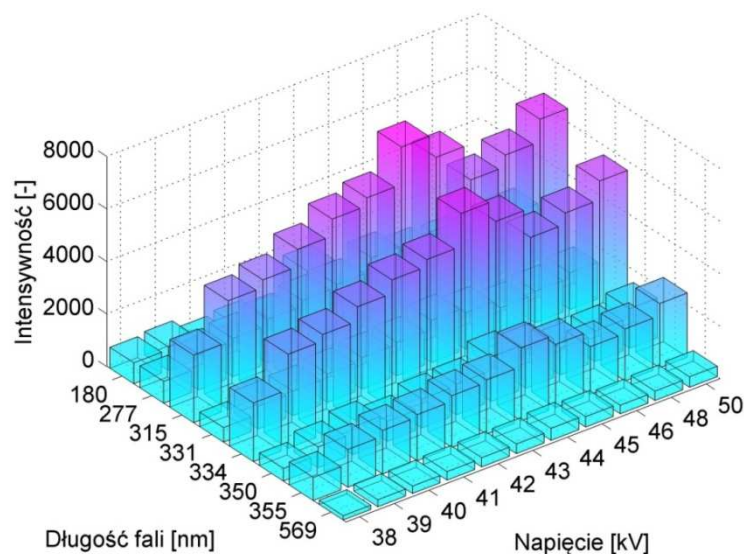


Rys. 46 Zestawienie wartości współczynnika $RMSE$ uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.



Rys. 47 Zestawienie wartości współczynnika SSE uzyskanych w procesie regresji modelu M1 dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów.

Na podstawie analizy wartości współczynnika R^2 stwierdzono, że opracowany model M1 w przeważającej większości przypadków uzyskuje doskonałe dopasowanie, o czym świadczą wartości bliskie jedności. Jedynie dla mniejszych i największych z rozpatrywanych napięć generacji WNZ uzyskano słabsze lub brak dopasowania. Powodem tego jest brak w zarejestrowanym widmie dominujących długości fal, emitowanych przez WNZ przy tych napięciach. Zastosowanie modelu M1 pozwoliło na dokładne określenie intensywności i długości najbardziej dominujących fal świetlnych w rejestrowanym widmie emitowanym przez WNZ. Na rys. 48 przedstawiono intensywności poszczególnych długości fal w zależności od wartości napięcia zasilającego badany układ.



Rys. 48 Zależność intensywności poszczególnych składowych widma, uzyskanego w procesie regresji z wykorzystaniem modelu M1, w funkcji napięcia generacji WNZ.