



Politechnika Opolska
Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Mgr inż. Sławomir Krzewiński

**Widma emisyjne wyładowań ulotowych
generowanych w modelach linii
elektroenergetycznych**

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

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

Opole, 2016r.

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 podczas powstawania
niniejszej pracy.***

***Dziękuję wszystkim pracownikom Instytutu
Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej Politechniki
Opolskiej za okazaną pomoc i życzliwość,
której doświadczałem.***

***Szczególne podziękowania składam mojej żonie Annie
i córce Magdalenie oraz całej rodzinie za cierpliwość
i wsparcie.***

Autor

Spis treści

str.

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	4
1. Wprowadzenie	5
2. Cel, zakres, teza pracy	9
3. Zjawisko ulotu w liniach elektroenergetycznych	10
3.1. Charakterystyka zjawiska wyładowań ulotowych	10
3.2. Opis skutków powodowanych przez ulot	13
3.3. Metody ograniczania występowania ulotu	16
3.4. Wielkości charakteryzujące badane zjawisko	16
3.5. Aspekt ekonomiczny	18
4. Literaturowy przegląd zagadnienia	19
5. Metrologiczne możliwości detekcji i pomiarów widm emisyjnych	29
5.1. Spektrofotometr	29
5.2. Kamera UV	31
5.3. Ograniczenia metrologiczne i techniczne poszczególnych metod	33
6. Pomiar widm emisyjnych wyładowań ulotowych generowanych w modelu linii elektroenergetycznych z trójkątnym układem przewodów	35
6.1. Charakterystyka układu probierczego wysokiego napięcia	35
6.2. Dobór deskryptorów charakteryzujących rejestrowane widma emisyjne	37
6.3. Metodyka i zakres przeprowadzonych pomiarów	38
7. Analiza i interpretacja wyników pomiarów uzyskanych metodą spektrofotometrii	40
7.1. Numeryczne metody i programy wykorzystane w analizie i interpretacji zarejestrowanych wyników	40
7.2. Program badawczy prowadzonych w rozprawie pomiarów	43
7.3. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium, typ AL	44
7.4. Zestawienia porównawcze wyników uzyskanych z przeprowadzonych analiz dla badanych typów linii	52
7.4.1. Zależność najwyższej wartości intensywności widma od odległości między przewodami linii wykonanymi z różnych materiałów dla różnych wartości napięcia generacji ulotu	52
7.4.2. Zależność najwyższej wartości intensywności widma od wartości napięcia generacji ulotu dla kolejnych odległości między przewodami linii wykonanymi z różnych materiałów	56
7.4.3. Zależność liczby składowych widma od odległości między przewodami linii wykonanych z różnych materiałów dla różnych wartości napięcia generacji ulotu	65
7.4.4. Zależność liczby składowych widma od wartości napięcia generacji ulotu dla różnych odległości między przewodami linii wykonanymi z różnych materiałów	69
7.5. Interpretacja i podsumowanie wyników analiz sygnałów optycznych zarejestrowanych metodą spektrofotometrii	77

8. Analiza i interpretacja wyników pomiarów emisji świetlnej zarejestrowanych kamerą w zakresie UV	81
8.1. Numeryczne metody i programy wykorzystane w analizie i interpretacji zarejestrowanych wyników	81
8.2. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanych z różnych materiałów	84
8.2.1. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej z aluminium, typ AL.	84
8.2.2. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, typ AlMg5	86
8.2.3. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu, typ AlSi5	89
8.2.4. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, typ FeCu	91
8.2.5. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej ze stali z domieszką chromu i niklu, typ MIG308LSi	94
8.3. Zależność liczby zliczeń punktów emisyjnych od napięcia generacji dla różnych odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów	96
8.4. Interpretacja i podsumowanie wyników analiz sygnałów optycznych zarejestrowanych kamerą w zakresie UV	104
9. Podsumowanie	106
LITERATURA	108
ZAŁĄCZNIK NR 1	
Wyniki i interpretacje wyników pomiarów uzyskanych metodą spektrofotometrii	116
ZAŁĄCZNIK NR 2	
Płyta zawierająca wersję elektroniczną rozprawy i zestawienie w postaci graficznej wszystkich uzyskanych wyników pomiarów oraz analiz wraz z listingami programów prowadzonymi w środowisku MATLAB	141

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

wnz	- wyładowanie niezupełne,
U_p	- napięcie przebicia układu izolacyjnego,
ϕ	- średnica przewodów wykorzystanych do badań,
d	- odległość między przewodami linii elektroenergetycznej,
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,
ΔP_{ulot}	- straty mocy czynnej spowodowane ulotem [kW/km],
$U_{f\acute{s}r}^2$	- średnia wartość napięcia fazowego [kV],
U_f	- wartość skuteczna napięcia fazowego linii [kV],
U_{fkr}	- wartość skuteczna napięcia krytycznego (napięcie początkowe ulotu) [kV],
$d_{\acute{s}r}$	- średnia odległość między przewodami / odległość do ziemi [cm],
r	- promień przewodu [cm],
U_0	- napięcie początkowe ulotu [kV/cm], zależne od rodzaju napięcia, konfiguracji przewodów i warunków pogodowych,
m_p	- współczynnik zależny od stanu powierzchni przewodu [-]: <ul style="list-style-type: none">• nowy (idealnie gładki) przewód jednodrutowy $m_p = 1$, lub $(0,92 \div 0,98)$,• stary (chropowaty) przewód jednodrutowy $m_p \in (0,8 \div 0,9)$,• linka miedziana $m_p \in (0,83 \div 0,92)$.
m_a	- współczynnik zależny od warunków atmosferycznych [-]: <ul style="list-style-type: none">• pogoda sucha, słoneczna $m_a = 1$,• pogoda deszczowa, mglista, śnieżna $m_a \leq 0,8$.
f	- współczynnik polaryzacji napięcia [-]. Napięcie dodatnie: $f=0,5$, napięcie ujemne: $f=1$,
δ	- współczynnik zależny od ciśnienia i temperatury powietrza (gęstość względna), w warunkach normalnych $\delta = 1$ [-],
K	- współczynnik korygujący [$\text{cm}^{1/2}$] zależny od rodzaju napięcia i konfiguracji przewodów,
E_x	- natężenie pola określającego granicę strefy ulotu (zasięg ulotu) [V/m],
x	- odległość od elektrody ulotowej [m],
r	- promień krzywizny elektrody ulotowej [m],
a	- odległość od przewodu do ziemi [m].

Oznaczenia materiałów, z których wykonano badane modele trójfazowych linii elektroenergetycznych

AL	- linia o trójkątnym układzie przewodów o średnicy $\phi=1,2$ mm wykonana z przewodów o zawartości aluminium 99,5%,
AlMg5	- linia o trójkątnym układzie przewodów wykonana z przewodów o średnicy $\phi=1,2$ mm o zawartości aluminium 94,4792% i zawartości magnezu 4,89%,
ALSi5	- linia o trójkątnym układzie przewodów wykonana z przewodów o średnicy $\phi=1,2$ mm o zawartości aluminium 94,6751% i zawartości krzemu 5,11%,
FeCu	- linia o trójkątnym układzie przewodów wykonana z przewodów o średnicy $\phi=1,2$ mm wykonanych ze stali powierzchniowo miedziowanej,
MIG308LSi	- linia o trójkątnym układzie przewodów wykonana z przewodów o średnicy $\phi=1,2$ mm o zawartości głównych składników: chrom 19,6%, nikiel 9,08%, mangan 1,85%, żelazo 68% (stal nierdzewna).

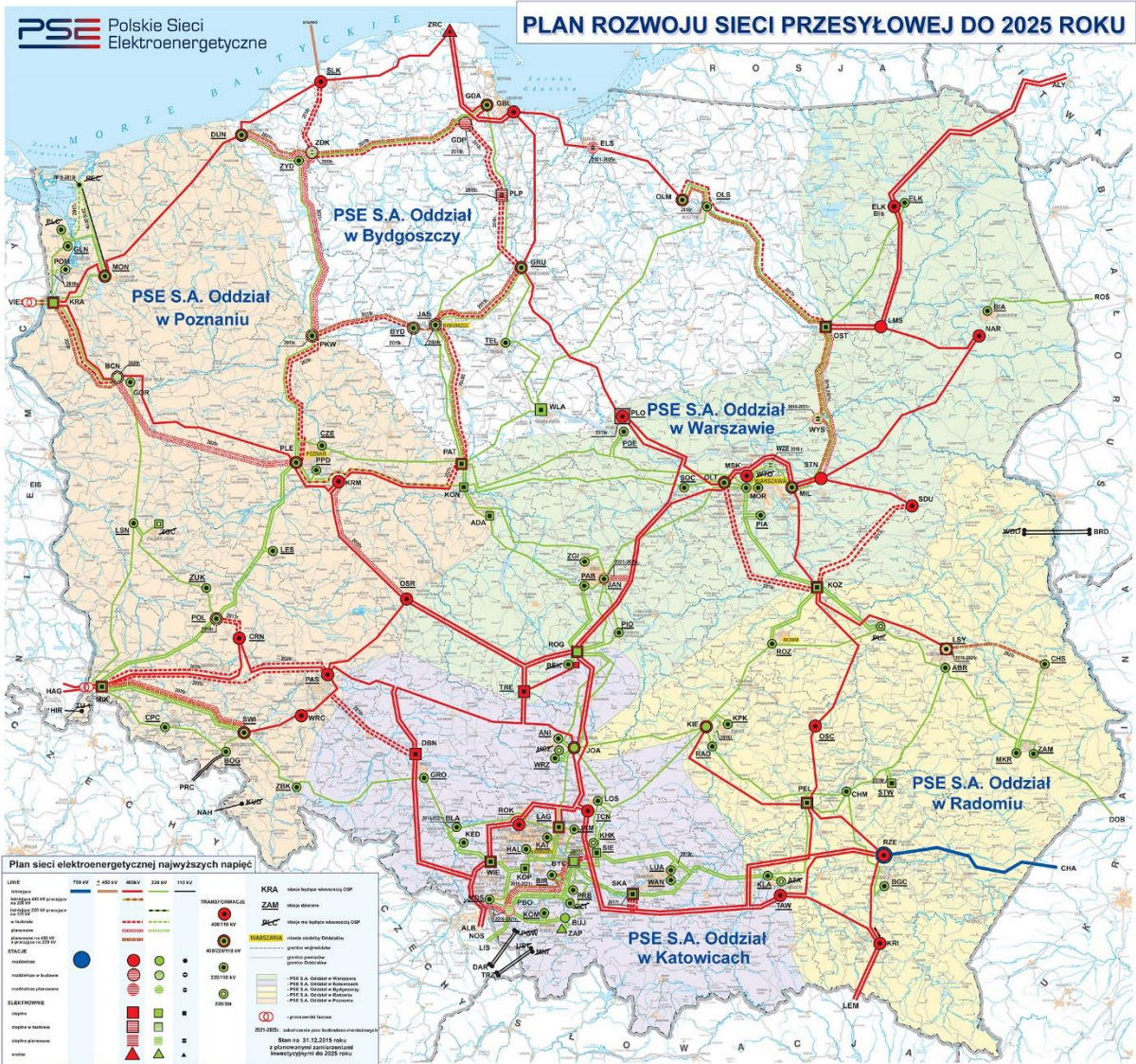
1. Wprowadzenie

Tematyka dysertacji umiejscowiona jest w dyscyplinie Elektrotechnika, w specjalności Technika Wysokich Napięć i dotyczy diagnostyki linii przesyłowych wysokiego napięcia. Linie przesyłowe najwyższych napięć (220, 400, 750 kV), linie wysokiego napięcia (110 kV) i linie rozdzielcze, obok elektrowni i stacji elektroenergetycznych, stanowią podstawowe elementy systemu elektroenergetycznego, którego zadaniem jest wytworzenie energii elektrycznej i przesłanie jej do odbiorców indywidualnych. Wszystkie elementy systemu elektroenergetycznego winny działać stabilnie i niezawodnie, przy możliwie najniższych kosztach. Przerwy w dostawie energii elektrycznej do dostawców mogą powodować znaczące straty finansowe. W sytuacjach grożących awarią, czas reakcji powinien być jak najkrótszy, dlatego konieczne jest stosowanie w urządzeniach elektroenergetycznych nowoczesnej, zautomatyzowanej aparatury zabezpieczeniowej [76].

Do przesyłu energii elektrycznej stosuje się trójfazowe, napowietrzne lub kablowe linie przesyłowe. Linie te zasilane są ze źródeł zlokalizowanych w elektrowniach. Za pomocą transformatorów dużej mocy dopasowuje się pożądaną wartość napięcia. Zmiany poziomów napięcia wykonuje się w elektrowniach (transformatory blokowe) i w stacjach elektroenergetycznych.

Eksploatacja linii przesyłowych wiąże się ze stratami energii, które generują dodatkowe koszty. Główną przyczyną powstawania strat w liniach przesyłowych jest ich nagrzewanie się na skutek przepływu prądu. Przy zachowaniu pożądanego poziomu mocy, wartość prądu można obniżyć poprzez jednoczesne podniesienie wartości napięcia. Dlatego w celu zminimalizowania strat energii elektrycznej buduje się linie przystosowane do przesyłu najwyższych napięć. Powoduje to z kolei podniesienie kosztów produkcji pozostałych elementów systemu, w tym: izolatorów, przewodów, osprzętu i konstrukcji wsporczych. W zależności od odległości na jaką przesyłana jest energia elektryczna stosuje się różne poziomy napięć. Na największe odległości energię przesyła się sieciami przesyłowymi o najwyższych napięciach, tj. 220 kV - 750kV. Następnie energia jest rozdzielana i przesyłana liniami w sieci rozdzielczej (dystrybucyjnej) o napięciu pracy od 6 kV do 110 kV. Do odbiorców indywidualnych dociera energia o napięciu wynoszącym 230/400 V.

Właścicielem i gospodarzem sieci przesyłowej linii elektroenergetycznych najwyższych napięć jest w Polsce PSE S.A, który realizuje zadania operatora systemu przesyłowego [75]. Aktualny plan rozwoju sieci przesyłowej do roku 2025, przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1 Plan rozwoju sieci elektroenergetycznej najwyższych napięć w Polsce [77].

Na dzień 31.12.2015 r. sieć elektroenergetyczną kraju tworzy 257 linii o łącznej długości 14 069 km, w tym:

- jedna linia o napięciu 750 kV o długości 114 km,
- 89 linii o napięciu 400 kV o łącznej długości 5 984 km,
- 167 linii o napięciu 220 kV o łącznej długości 7 971 km,
- 106 stacji najwyższych napięć,
- podmorskie połączenie 450 kV DC Polska – Szwecja o całkowitej długości 254 km (z czego 127 km należy do PSE S.A.).

Sieci dystrybucyjne klasyfikuje się zgodnie z wartością napięcia znamionowego:

- sieć wysokich napięć 110 kV,
- sieć średnich napięć 6, 10, 15, 20 kV,
- sieć niskich napięć: 400/230V.

W pracy rozpatrywano modele sieci linii elektroenergetycznych pracujących w trójkątnym układzie przewodów o napięciu 110kV. Sieć 110 kV wykorzystywana jest także do dystrybucji energii elektrycznej, przede wszystkim pracuje podobnie jak sieć przesyłowa. Do sieci dystrybucyjnej 110 kV przyłącza się farmy wiatrowe o mocach kilkudziesięciu MW i elektrownie do ok. 200 MW. Sieci 110 kV zasilają zakłady przemysłowe wymagające dużych mocy, jak kopalnie i huty oraz duże zakłady produkcyjne.

Elementem składowym każdej linii napowietrznej są:

- 1) słupy, zazwyczaj betonowe lub stalowe, kratowe lub rurowe konstrukcje wsporcze,
- 2) przewody fazowe i odgromowe,
- 3) izolatory; stosowane są głównie izolatory długopniowe.

Jako przewody robocze, które przewodzą prąd obciążenia linii i jako przewody odgromowe stosuje się stalowo-aluminiowe, wielodrutowe przewody gołe, tj. niez izolowane [48]. W liniach 110 kV stosowane są przewody pojedyncze, a w liniach 220 kV i 400 kV stosuje się dwu- i trójprzewodowe wiązki, które charakteryzują się mniejszymi stratami ulotowymi. W zależności od wymagań mechanicznych, związanych m.in. z siłą wiatru, możliwością powstawania oblodzeń i sadzi [22] lub też deformacji terenu [97] oraz w zależności od prądu obciążenia, w liniach przesyłowych stosuje się przewody o różnych przekrojach. Dobór odpowiedniej grubości przewodu winien minimalizować ryzyko zerwania się linii nawet w sytuacjach ekstremalnych. Przewody odgromowe mają na celu zabezpieczenie przewodów roboczych i pozostałych elementów przed skutkami wyładowań atmosferycznych. W liniach przesyłowych o napięciach 110 kV i wyższych, jeden lub dwa przewody odgromowe mocuje

się w określonej odległości powyżej przewodów roboczych. Obecnie instalowane konstrukcje przewodów odgromowych zawierają światłowód do transmisji sygnałów użytecznych [76].

W procesie projektowania traktów energetycznych wykorzystuje się odpowiednie normy:

- PN-IEC 1089:1994 Przewody gołe okrągłe o skręcie regularnym do linii napowietrznych.
- PN-IEC 1089:1994/A1:2000 Przewody gołe okrągłe o skręcie regularnym do linii napowietrznych.
- PN-IEC 1089:1994/Ap1:1999 Przewody gołe okrągłe o skręcie regularnym do linii napowietrznych.
- PN-E-90081:1974 Elektroenergetyczne przewody gołe -- Przewody miedziane.
- PN-E-90151:1983 Kable i przewody elektryczne -- Własności drutów aluminiowych.
- PN-E-05100-1:1998. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami roboczymi gołymi.
- PN-EN-50341-3-22:2010. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 3: Zbiór normatywnych warunków krajowych. Polska wersja EN 50341-3-22:2001.

Uwzględnienie przy budowie linii elektroenergetycznej wymagań określonych w ww. normach nie gwarantuje, że nie nastąpi awaria w systemie przesyłowym. Przewody linii mogą ulec zerwaniu np. na skutek huraganu lub szybko marznącego śniegu. Jednak zdecydowanie większe zagrożenie związane jest z awarią izolatorów, służących separacji przewodów od konstrukcji wsporczych. Na skutek pęknięcia izolatora może dojść do zerwania linii, stąd stosuje się podwójne lub potrójne łańcuchy izolatorów. Eksploatacja linii przesyłowych w warunkach ekstremalnych, przy dużej wilgotności i temperaturze może powodować powstawanie wnz na powierzchniach izolatorów, co z kolei przyspiesza proces ich starzenia się. Innym typem zagrożenia awarią linii przesyłowych jest ryzyko odkształcenia się konstrukcji wsporczych podczas huraganów lub trzęsień ziemi.

W Politechnice Opolskiej od wielu lat prowadzone są prace naukowo-badawcze zmierzające do doskonalenia metod diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Mechanizm powstawania i propagacji wnz, technika detekcji i lokalizacji, sposoby ich klasyfikacji i modelowania komputerowego to przykładowe problemy, którymi zajmuje się zespół w Instytucie Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej na Politechnice Opolskiej. Problematyka rozpatrywana w dysertacji zawiera się w tym obszarze badawczym i dotyczy badania widm emisyjnych wnz typu ulotowego, generowanych na liniach przesyłowych wysokiego napięcia. Stanowi ona kontynuację prowadzonych w instytucie od około 10 lat prac.

2. Cel, teza i zakres pracy

Naukowym celem pracy jest określenie spektrofotometrem i wysokoczułą kamerą UV widm emisyjnych wyładowań elektrycznych typu ulotowego, występujących na powierzchni linii elektroenergetycznych wykonanych z różnych materiałów.

W rozprawie przyjęto następującą tezę:

"Widma emisyjne, szczególnie w zakresie UV, związane z wyładowaniami typu ulotowego mogą stanowić bardziej czuły i precyzyjny symptom występowania takich wyładowań, niż stosowane do tej pory miary elektryczne (U_0 i U_s). Znajomość widm wnz charakterystycznych dla materiału z jakiego są wykonane przewody linii elektroenergetycznej może być użyteczna technicznie w bardziej skutecznej diagnostyce linii elektroenergetycznych".

W celu udowodnienia przyjętej tezy w rozprawie podjęto następujące zagadnienia:

- omówiono fizykę zjawiska ulotu,
- przedstawiono metrologiczne możliwości detekcji i pomiarów widm emisyjnych,
- scharakteryzowano układy pomiarowe i wykorzystywane w badaniach materiały z których są budowane linie elektroenergetyczne,
- przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów i analiz numerycznych emisji świetlnej rejestrowanej z wykorzystaniem kamery UV i spektrofotometru,
- porównano uzyskane wyniki, przedstawiono ich interpretację i sformułowano wnioski.

Celem pracy jest rozpoznanie zjawiska ulotu wokół przewodów stanowiących model linii elektroenergetycznej wykonanych z różnych materiałów metodami optycznymi. Wyniki uzyskane w rozprawie będą stanowiły materiał do udoskonalenia technicznych metod diagnostyki.

Celem technicznym rozprawy jest ocena napięcia początkowego wyładowań ulotowych w oparciu o widma emisyjne z większą czułością niż było to dotychczas możliwe w oparciu o miary elektryczne U_0 i U_s .

Zakres pracy obejmuje:

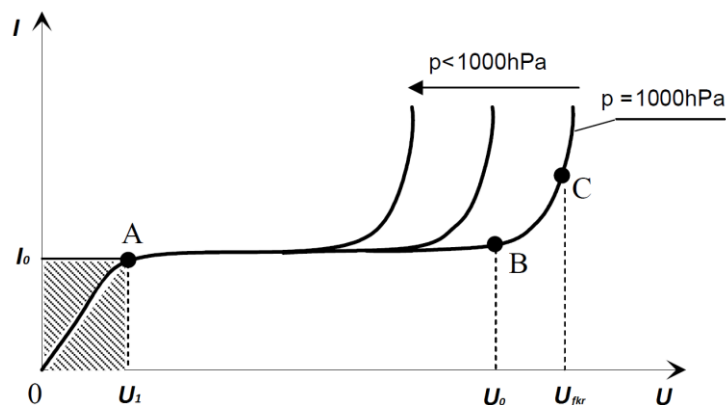
- przegląd literatury dotyczącej badanego zjawiska,
- zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego umożliwiającego badanie fizycznych zjawisk związanych z ulotem w modelu trójfazowej linii elektroenergetycznej,

- dobór materiałów z których wykonano przewody badanych modeli linii trójfazowej,
- dobór adekwatnej metodologii pomiarowej,
- wykonanie pomiarów laboratoryjnych,
- analizę uzyskanych wyników z wykorzystaniem metod numerycznych.

3. Zjawisko ulotu w liniach elektroenergetycznych

3.1. Charakterystyka zjawiska wyładowań ulotowych

Naturalnym izolatorem dla napowietrznych linii elektroenergetycznych jest powietrze. W warunkach normalnych powietrze jest prawie idealnym izolatorem. Jednak na skutek oddziaływania naturalnego promieniowania jonizacyjnego i procesów dejonizacyjnych w powietrzu obecna jest określona ilość ładunków swobodnych, które w polu elektrycznym dryfują zgodnie z jego liniami sił. Powstały w ten sposób przepływ prądu powoduje wzrost energii kinetycznej cząstek znajdujących się w powietrzu. Na rys 3.1 przedstawiono charakterystykę jonizacji czyli zależność prądu od napięcia przyłożonego do elektrody w układzie generującym pole jednorodne. Przy małych napięciach, tj. w zakresie od 0 do U_1 , następuje odpływ ładunków z przestrzeni między elektrodowej do elektrody. W tym czasie gęstość prądu I_0 jest proporcjonalna do napięcia i charakterystyka ma przebieg liniowy. Po osiągnięciu punktu A, gęstość prądu osiąga stan nasycenia. W warunkach normalnych w powietrzu: $U_1 \cong 1 \text{ V/m}$, $I_0 \in (10^{-18} \div 10^{-20}) \text{ A/cm}^2$.



Rys. 3.1 Zależność prądu od napięcia w polu jednorodnym. U_1 - napięcie prądu nasycenia, U_0 - napięcie początkowe jonizacji zderzeniowej, U_{tr} - napięcie krytyczne. [31, 32]

Wzrost wartości napięcia, a tym samym natężenia pola elektrycznego, pomimo wzrostu przyspieszenia ruchu cząstek nie powoduje dalszego wzrostu gęstości prądu dzięki ustabilizowanemu procesowi jonizacji, aż do osiągnięcia punktu **B**. Po przekroczeniu wartości U_0 , elektrony uzyskują energię kinetyczną, która jest wystarczająca do jonizacji zderzeniowej z cząsteczkami obojętnymi gazu. Występujące zderzenia jonizujące powodują gwałtowny wzrost gęstości prądu i powstanie lawin elektronowych, zwanych wyładowaniami niesamodzielnymi. Ustają one gdy zniknie powodujące je pole elektryczne. W warunkach normalnych w powietrzu: $U_0 \cong 24,4$ kV/cm. Dalszy wzrost napięcia, powyżej wartości krytycznej U_{fkr} , (punkt **C**), powoduje wyładowanie samodzielne związane z emisją elektronów z katody wywołaną przez jony i fotony. Może ono mieć postać wnz, obejmującego tylko lokalną część przestrzeni międzyelektrodowej. Dalszy gwałtowny wzrost prądu powoduje przekroczenie wytrzymałości elektrycznej powietrza, co oznacza wyładowanie zupełne i zwarcie iskrowe w obwodzie. Wtedy natężenie prądu nie zależy od rodzaju dielektryka i mechanizmu powstawania naładowanych cząstek tylko od parametrów obwodu elektrycznego. Przebieg wyładowania zależy natomiast od współczynnika niejednostajności pola β , odległości między elektrodami a i ciśnienia gazu p . Istnieją trzy podstawowe mechanizmy rozwoju wyładowań:

- mechanizm Townsenda, który występuje przy małych wartościach iloczynu $ap \in (100 \div 1000)$ hPa*cm,
- mechanizm kanałowy: strimerowy dla $ap \in (10^3 \div 10^5)$ hPa*cm i strimerowo-liderowy dla $ap > 10^5$ hPa*cm,
- mechanizm próżniowy, dla podciśnień o wartościach zbliżonych do próżniowych.

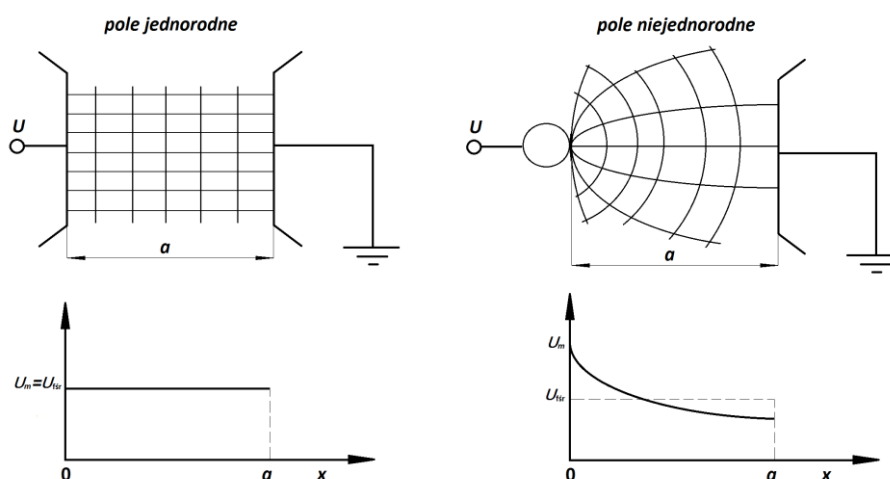
Zjawisko ulotu jest wnz w powietrzu, które występuje w otoczeniu elektrod o dużej krzywiznie, tj. w polu silnie niejednostajnym, w sytuacji gdy natężenie pola przekracza natężenie początkowe. Pola niejednostajne powstają wokół elektrod o ostrych krawędziach, wokół przewodów o małym promieniu r znajdujących się w odległości a od drugiej elektrody (ziemi) takiej, że $a \gg r$. Na rys 3.2 przedstawiono rozkład pola $E(x)$ w przestrzeni międzyelektrodowej. Krzywe tego pola odnoszą się do największych wartości ułożonych wzdłuż najkrótszej linii sił pola. W przypadku pola jednostajnego najkrótsza linia sił pola jest równa odległości a między elektrodami. Natomiast pole pod krzywą $E(x)$ określa narażenie napięciowe układu U [6].

Można je wyrazić równaniem (3.1):

$$U = \int_0^a E(x) dx \quad (3.1)$$

Równanie (3.2) określa wartość średnią natężenia pola w polu jednostajnym:

$$U_{f\acute{s}r} = \frac{U}{a} \quad (3.2)$$



Rys. 3.2 Rozkład naprężeń w polu jednostajnym i niejednostajnym. [31]

Wzrost niejednostajności pola powoduje zmianę rozkładu linii sił pola, a poziom niejednostajności β określa się zależnością (3.3), [6] i [7].

$$\beta = \frac{U_m}{U_{f\acute{s}r}} \quad (3.3)$$

Równanie (3.4) określa wartość maksymalną natężenia pola w polu niejednostajnym:

$$U_m = \frac{U}{a} \beta \quad (3.4)$$

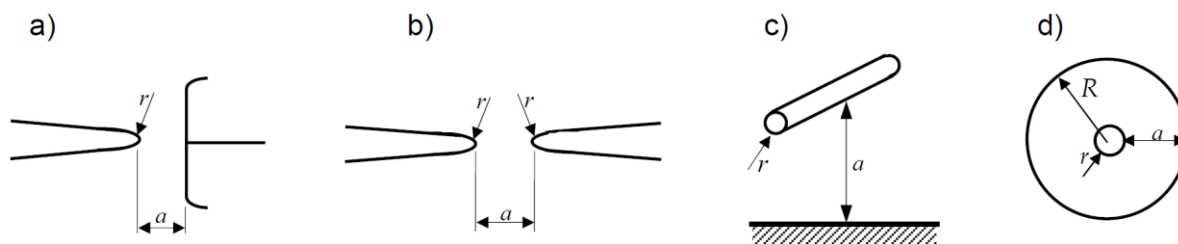
Gradient napięcia zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości od elektrody ulotowej, stąd ulot występuje tylko w najbliższym jej otoczeniu.

W sytuacji gdy U_m osiąga wartość krytyczną U_{fkr} , następuje utrata właściwości izolacyjnych. Jeżeli dodatkowo wartość β wzrośnie, spowoduje to ograniczenie wytrzymałości układu izolacyjnego. Wartość współczynnika β zależy od rodzaju i geometrii układu izolacyjnego. Dla układu trójkątnego trzech przewodów wyrażą się on zależnością (3.5) [31].

$$\beta = \frac{a}{r} \frac{1,15}{2 \ln\left(\frac{a}{r} + 2\right)}, \text{ przy } a/r \geq 10 \quad (3.5)$$

Zjawisko ulotu można badać w modelach przedstawionych na rys. 3.3, w postaci układu ostrze-płaszczyzna, ostrze-ostrze, przewód-ziemia, walce współosiowe lub kule współosiowe.

Ulot występujący na linii przesyłowej modeluje się wykorzystując układ przewód-płaszczyzna, która oznacza ziemię, jak to przedstawiono na rys. 3.2 lub na rys. 3.3c.



Rys. 3.3 Szkice układów modelowych charakterystycznych przypadków występowania ulotu elektrycznego: a) ostrze-płaszczyzna, b) ostrze-ostrze, c) przewód-ziemia, d) walce współosiowe lub kule współśrodkowe, r – promień elektrody ulotowej. [32]

Wnz typu ulotowego, które charakteryzuje się poprzez impulsy prądowe w układach pomiarowych, stanowią przyczyny zakłóceń w czasie wykonywania pomiarów. Są to zakłócenia ciągłe lub stochastyczne, które powiększają szum pomiarowy. Amplituda i odstępy czasowe między lokalnie występującymi impulsami prądowymi zależą, jak wspomniano wcześniej, od promienia krzywizny elektrody ulotowej, odległości między elektrodami o różnych potencjałach, rodzaju i charakteru napięcia zasilania. W trakcie trwania pomiaru sygnałów użytecznych należy wyeliminować źródło sygnałów zakłócających lub prawidłowo je rozpoznać i uwzględnić podczas analiz. Prawidłowa detekcja sygnałów użytecznych uzależniona jest od stosunku sygnału właściwego do szumu, którego wartość z kolei zależy od rodzaju i intensywności wyładowań zakłócających.

3.2. Opis skutków powodowanych przez ulot

Ulot jest charakterystycznym zjawiskiem w bezpośredniej okolicy przewodów fazowych napowietrznych linii wysokiego i najwyższych napięć. Może również występować na izolatorach, iskiernikach i komorach elektrofiltrów. Jest on jedną z przyczyn powstawania strat energii przesyłanej przez linię. Straty związane z ulotem razem ze stratami związanymi z wpływem prądu przez izolację są traktowane jako straty mocy czynnej poprzecznej i odzwierciedlane przez konduktancję linii. Konduktancję linii wyznacza się ze wzoru:

$$G_k = \frac{\Delta P_{ulot}}{U_{f\acute{s}r}^2} \quad (3.6)$$

gdzie:

ΔP_{ulot} - straty mocy czynnej spowodowane ulotem [kW/km],

$U_{f\acute{s}r}^2$ - średnia wartość napięcia fazowego [kV].

Straty mocy czynnej w liniach napowietrznych, w linii dwuprzewodowej lub trójfazowej, ΔP_{ulot} przy częstotliwości 50 Hz w warunkach normalnych oblicza się ze wzoru wyprowadzonego empirycznie przez F.W. Peaka [73]. Przedstawiają one zależność paraboliczną w funkcji napięcia.

$$\Delta P_{ulot} = 0,18 \sqrt{\frac{r}{d_{sr}}} (U_f - U_{fkr})^2 \quad (3.7)$$

gdzie:

U_f - wartość skuteczna napięcia fazowego linii [kV],

U_{fkr} - wartość skuteczna napięcia krytycznego (napięcie początkowe ulotu) [kV].

d_{sr} - średnia odległość między przewodami / odległość do ziemi [cm].

r - promień przewodu [cm].

Prąd ulotowy występuje tylko w niektórych zakresach fazowych w okresie napięcia przemiennego i powoduje odkształcenie przebiegu całkowitego prądu. Prąd ulotu wzrasta wraz ze wzrostem napięcia, a jego wartość może przekroczyć prąd pojemnościowy. Straty mocy czynnej powodowane ulotem są znaczne, szczególnie w długich liniach napowietrznych w czasie trwania złych warunków atmosferycznych, np. w obecności śniegu i wilgoci mogą osiągnąć wartości kilkuset kW/km linii [32].

Innym zjawiskiem powodowanym przez ulot są zakłócenia pracy urządzeń telekomunikacyjnych, radiowych i innych. Ulot powoduje również hałas, w postaci charakterystycznych trzasków, których intensywność wzrasta w zależności od warunków pogodowych. Ponadto postępujące w czasie wzn powodują korozję przewodów i przyspieszają procesy starzeniowe.

W literaturze znajduje się szereg publikacji dotyczących wyników prac naukowo-badawczych nad skutkami wyładowań ulotowych. Przykładowo w publikacji [30] autorzy rozpatrują skutki wyładowań ulotowych generowanych wokół jednożyłowej linii przesyłowej. W badaniach wykorzystano technikę TLM (*ang. Transmission-Line Modelling*), a obliczenia zastosowane w modelowaniu uwzględniają zmiany napięcia i prądu, a także uproszczony model symulacji wyładowania ulotowego. Autorzy w pracy [92] badają wpływ wyładowania ulotowego na prąd stały, którego przepływ może być zaburzony wskutek pojawienia się wyładowania ulotowego co prowadzi do dodatkowej straty mocy. Artykuł opisuje zjawiska fizyczne tego efektu na poziomie jakościowym. W pracy [70] opisano różne sposoby pomiaru szumu, powstającego podczas wyładowań, przy wysokim napięciu stałym. Uwzględniono wpływ wybranych czynników na generację ulotu i określono poziomy interferencji radiowych,

mających wpływ na systemy komunikacyjne, telewizyjne i straty energii, a także słyszalny szum. Analiza promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez wyładowania ulotowe na wysokonapięciowej linii przesyłowej znajduje się w pracy [65], w której zaproponowano metodę numeryczną do prognozowania interferencji radiowych w zależności od struktury linii przesyłowej. Obliczaniem i analizą poziomów interferencji radiowych w liniach przesyłowych wysokiego napięcia wywołanych ulotem zajmują się autorzy w publikacji [90], którzy wykorzystują do tego celu metodę Gary'ego i teorię DMD (*ang. Dynamic Mode Decomposition*). Natomiast w pracy [67] opisano wpływ natężenia pola elektrycznego na przebieg wyładowania ulotowego w liniach przesyłowych wysokiego napięcia stałego. Autorzy opracowali technikę obliczeniową służącą do symulowania pól elektrycznych w sąsiedztwie linii przesyłowych i określania ich wpływu na dystrybucje pól elektrycznych na powierzchniach przewodników. Ponadto autorzy zastosowali to rozwiązanie w warunkach przemysłowych w celu określenia wpływu pól elektrycznych na interferencje radiowe, szum słyszalny, pole elektryczne na ziemi, a także na rozkłady przepływu jonów. Autorzy w pracy [108] przedstawili wyniki analizy częstotliwości pola elektrycznego generowanego przez linie przesyłowe wysokiego napięcia prądu przemiennego w warunkach wyładowań ulotowych. W celu zbadania wpływu wyładowania na rozkład pola elektrycznego, zastosowano metodę symulacji wyładowania oraz teorię superpozycji. Na podstawie otrzymanych rezultatów stwierdzono zniekształcenie pola elektrycznego pod wpływem ulotu i cykliczną zmianę krzywej rozkładu wyładowania. W pracy [93] autorzy przedstawili wyniki badań szerokopasmowego szumu radiowego przesyłowych, wysokonapięciowych linii napowietrznych prądu przemiennego, w trakcie których zastosowano małe klatki do generacji wyładowań ulotowych. Zdaniem autorów, takie klatki umożliwiają badanie mechanizmów fizycznych ulotu oraz predykcję szumów radiowych. Do oszacowywania strat powstałych wskutek wyładowań ulotowych występujących na liniach przesyłowych wysokiego napięcia prądu stałego, autorzy pracy [95] zaprojektowali specjalne rozwiązanie, umożliwiające filtrację prądów generowanych przez ulot. Autorzy założyli, że prąd wyładowania i procesy szumów w tle, znajdują się w tym samym paśmie częstotliwości. W publikacji [102] autorzy analizują charakterystyki impulsowego wyładowania ulotowego na wysokonapięciowej linii przesyłowej prądu przemiennego o wartości napięcia 1000 kV. Badają również ich wpływ na wyniki analizy przepięć. W celu wykonania badań autorzy na modelu zasymulowali wyładowania ulotowe oparte na formułach empirycznych krzywych Q-V. Wyniki badań pokazały, że impuls wyładowania ulotowego ma duży wpływ na przepięcie występujące w linii przesyłowej.

Podsumowując, należy stwierdzić, że ulot posiada głównie niekorzystny wpływ zarówno na same urządzenia przesyłowe jak i na przebieg pomiarów i jakość sygnałów użytkowych a przede wszystkim powoduje straty. Pozytywny aspekt ulotu objawia się w jego wpływie na zmniejszenie wartości szczytowej i stromości narastania fal przepięciowych generowanych np. przez wyładowania atmosferyczne [55].

3.3. Metody ograniczania występowania ulotu

Zjawisko ulotu jest zależne od napięcia znamionowego pracującej linii. Straty spowodowane ulotem są większe dla wyższych napięć. Z tego powodu przy projektowaniu linii dla napięć od 220 kV stosuje się specjalne konstrukcje przewodów fazowych w celu ich ograniczenia lub eliminacji. Ulot nie wystąpi gdy natężenie pola przy powierzchni przewodu, czyli elektrody ulotowej, będzie mniejsze niż napięcie początkowe ulotu. W tym celu dostosowuje się odpowiedni promień przewodu, np. w linii 220 kV $r \in (1,2 \div 1,5)$ i dwukrotnie większy dla linii 400 kV. Dla napięć powyżej 220kV i 400 kV stosuje się przewody wiązkowe, które stanowią połączone ze sobą w jedną fazę dwa lub więcej przewody. Ograniczenie ulotu w przewodach wiązkowych obniża jednocześnie poziom hałasu i zakłóceń radioelektrycznych, które są emitowane w czasie ulotu.

3.4. Wielkości charakteryzujące badane zjawisko.

Wyładowanie lawinowo-strimerowe w dielektryku gazowym, jakim jest ulot, zależy również od biegunowości elektrod i rodzaju napięcia. Przewód zasilany napięciem stałym powoduje emisję ulotu dodatniego lub ujemnego (impulsy Trichela) w zależności od biegunowości. Natomiast wokół przewodu zasilanego napięciem przemiennym występują oba typy ulotu, które zależą od charakteru zmian napięcia. Definiuje się trzy podstawowe formy wyładowań ulotowych: snopienie (wyładowanie łukowe), światlenie i wyładowanie ciemne. Przy napięciu początkowym ulot jest ciemny i nie generuje hałasu. W miarę wzrostu natężenia pola pojawiają się widzialne błyski, którym towarzyszy charakterystyczny dźwięk. Ujemne wyładowanie ulotowe ma postać wyładowań jarzących ciągłych. Dodatni ulot przy mniejszych napięciach generuje wyładowania impulsowe, a przy większych wyładowania iskrowe impulsowe. Ulot powstaje w obszarze, w którym następuje jonizacja zderzeniowa,

fotojonizacja i luminescencja. Strefa ta ograniczona jest poprzez wartość napięcia, w którym jego wartość jest większa niż napięcie początkowe ulotu, przy czym lokalne nierówności powierzchni przewodów i złe warunki pogodowe powodują obniżenie wartości napięcia początkowego. Dodatkowo strefa ulotu zależna jest od promienia krzywizny elektrody ulotowej r . Uwzględniając warunki pogodowe, gęstości powietrza, zanieczyszczenia i jakości izolacji (obecność uszkodzeń) i napięcie, wyznacza się wartość napięcia krytycznego [49, 87, 50]. Równanie to przyjmuje różne wartości współczynników w zależności od rodzaju układu, w jakim występują wyładowania ulotowe. Podstawowy wzór został wyznaczony przez F.W. Peeka i ma postać wyrażoną równaniem (3.8). Obecnie stosuje się zmodyfikowane formy tego wzoru.

$$U_{\text{fkr}} = U_0 m_p m_a f \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (3.8)$$

gdzie:

U_0 - napięcie początkowe ulotu [kv/cm], zależne od rodzaju napięcia, konfiguracji przewodów i warunków pogodowych,

m_p - współczynnik zależny od stanu powierzchni przewodu [-]:

- nowy (idealnie gładki) przewód jednodrutowy $m_p = 1$, lub (0,92÷0,98)
- stary (chropowaty) przewód jednodrutowy $m_p \in (0,8 \div 0,9)$
- linka miedziana $m_p \in (0,83 \div 0,92)$.

m_a - współczynnik zależny od warunków atmosferycznych [-]:

- pogoda sucha, słoneczna $m_a = 1$,
- pogoda deszczowa, mglista, śnieżna $m_a \leq 0,8$.

f - współczynnik polaryzacji napięcia [-]. Napięcie dodatnie: $f=0,5$, napięcie ujemne: $f=1$.

δ - współczynnik zależny od ciśnienia i temperatury powietrza (gęstość względna), w warunkach normalnych $\delta = 1$ [-].

K - współczynnik korygujący [$\text{cm}^{1/2}$] zależny od rodzaju napięcia i konfiguracji przewodów.

Rozkład natężenia pola elektrycznego dla układu przewód-ziemia, czyli walec-płaszczyzna, który rozpatrywany jest w niniejszej pracy, oblicza się ze wzoru:

$$E_x = \frac{U}{\left(x - \frac{x^2}{a} \right) \ln \frac{a-r}{r}} \quad (3.9)$$

gdzie:

E_x - natężenie pola określającego granicę strefy ulotu (zasięg ulotu) [V/m],

x - odległość od elektrody ulotowej [m],

r - promień krzywizny elektrody ulotowej [m],

a - odległość od przewodu do ziemi [m],
 U - napięcie fazowe przewodu [V].

Jeśli spełnione są warunki:

$$(r \ll a) \cap (a - r \cong a) \cap \left(\frac{r^2}{a} \ll r \right)$$

to maksymalne natężenie pola elektrycznego na powierzchni elektrody ulotowej E_m oblicza się ze wzoru:

$$E_m = \frac{U}{r \ln \frac{a}{r}} \quad (3.10)$$

Napięcie początkowe ulotu według wzorów Peek'a dla układu przewód-ziemia oblicza się ze wzoru:

$$U_{\text{fkr}} = 21,1\delta m_p m_a \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta r}} \right) r \ln \frac{a}{r} \quad (3.11)$$

Wartość napięcia początkowego może być inna dla ulotu dodatniego i ujemnego. Z uwagi na to, że wartość napięcia początkowego zależy od szeregu parametrów, w literaturze poświęcono wiele uwagi jego empirycznemu wyznaczeniu. Przykładowo w pracy [63], autorzy w zajmują się badaniem napięcia, przy którym występuje wyładowanie ulotowe na liniach przesyłowych wysokiego napięcia w oparciu o detekcję ultrafioletu. Fotony emitowane przez ulot były rejestrowane przez detektor UV, a ich ilość była traktowana jako intensywność wyładowania. Przy użyciu tej metody ustalano napięcie początkowe. W pracy [104] omówiono właściwości wyładowań ulotowych generowanych w warunkach niskiego ciśnienia atmosferycznego, dla różnych jego poziomów, przy dodatnim napięciu stałym. Do pomiarów zastosowano kamerę UV, specjalnie zaprojektowany czujnik prądu a także specjalne elektrody. Autorzy każdorazowo określali wartości napięcia początkowego i na podstawie rezultatów zaproponowali kilka wzorów empirycznych do jego kalkulacji. Nową metodę obliczania wartości napięcia początkowego ulotu występującego w napowietrznych liniach przesyłowych zaproponowano w pracy [106]. Zdaniem autorów, metoda może być stosowana przy napięciu ujemnym i dodatnim oraz uwzględnia natężenie pola elektrycznego i wartość ciśnienia na powierzchni sąsiadującej z przewodnikiem.

3.5. Aspekt ekonomiczny

Energia elektryczna dostarczana do odbiorców powinna docierać do nich w sposób ciągły i niezawodny. Jednak z powodu prowadzenia różnego rodzaju prac eksploatacyjnych i na skutek awarii, przerwy w dostarczaniu energii są nieuniknione. Poziom niezawodności

wzrasta wraz ze zwiększeniem nakładów na diagnostykę i nowe inwestycje. Obecnie przeprowadza się rachunek ekonomiczny, a nakłady inwestycyjne porównuje z zyskami osiągniętymi przez obniżenie strat. niezawodność dostarczania energii uzależniona jest od rodzaju i charakteru odbiorcy. Sieci o najniższych napięciach posiadają niski poziom niezawodności, natomiast najbardziej niezawodne muszą być sieci wysokiego napięcia, ponieważ w przypadku awarii, duża grupa odbiorców o mocy od kilkudziesięciu do kilkuset MW może być wtedy pozbawiona zasilania [97].

Sposoby obliczenia kosztów inwestycyjnych sieci elektroenergetycznych i kosztów strat rocznych w szczegółowy sposób opisano m.in. w [58].

Autorzy w publikacji [34] przedstawiają aktualne trendy w diagnostyce defektów występujących w liniach przesyłowych. Uwzględniają różne problemy i wpływy ekonomiczne oraz przedstawiają obszar badań i różne rozwiązania z zakresu diagnostyki linii przesyłowych.

4. Literaturowy przegląd zagadnienia

W kraju i na świecie prowadzone są prace badawczo-rozwojowe mające na celu rozwój technik diagnostycznych układów izolacyjnych i linii wysokiego napięcia. Badania te dotyczą detekcji i lokalizacji uszkodzeń, które powodują emisję wyładowań ulotowych. Przykładowo, w pracy [2] omówiono technikę monitorowania on-line stanu izolacji przewodów wysokiego napięcia pod kątem występowania wnz. Do pomiaru aktywności związanych z wnz zaproponowano zastosowanie nieinwazyjnych czujników HFCT (*ang. High Frequency Current Transformer*). Zdaniem autorów, technika wykorzystująca układy HFCT i TEV (*ang. Transient Earth Voltage*) jako czujniki jest prosta, a zarazem efektywna i może wykryć każde wnz na przewodach na długości 2,5 km od punktu pomiarowego. W pracy [4] autorzy przytaczają algorytm lokalizacji uszkodzeń w liniach elektroenergetycznych niewymagający podawania wartości parametrów liniowych. Algorytm wykorzystuje wartości niesynchronizowanych pomiarów napięcia i prądów z obu końców linii przesyłowej. Proponowane rozwiązanie jest niezależne od impedancji źródłowej. Poprawność i efektywność algorytmu została zweryfikowana przy pomocy danych symulacyjnych z programu ETP (*ang. Electromagnetic Transients Program*). W pracy [26] autorzy zajmują się opracowaniem algorytmu optymalizacyjnego, który może być zastosowany do detekcji uszkodzeń w liniach przesyłowych bazującego na pomiarze wartości napięcia i prądu w warunkach przejściowych. Dzięki zaproponowanej metodzie detekcja uszkodzenia możliwa jest nawet przy braku

niektórych pomiarów prądu. Zdaniem autorów metoda może stanowić użyteczne narzędzie zwiększające elastyczność systemów do lokalizacji usterek. W publikacji [25], która dotyczy diagnostyki wysokonapięciowych linii przesyłowych, a w szczególności lokalizacji defektów, zaproponowano nisko kosztowe rozwiązanie, skupiające się na synchronizacji pomiarów i lokalizacji usterek na linii pojedynczego i podwójnego obiegu. W celu detekcji miejsca w którym nastąpił defekt algorytm korzysta z zasady superpozycji. Autorzy pracy [19] zajmują się monitorowaniem, diagnostyką i badaniem wytrzymałości układów wysokiego napięcia, pracujących przy napięciu zmiennym, z występującymi wzn. Jako najlepszy, zdaniem autorów, system w zastosowaniu do testowania wskazano system ACRF, który można relatywnie łatwo przystosować do warunków naturalnych i połączyć z innymi urządzeniami służącymi do pomiaru wzn. W pracy [62] przedstawiono opracowany optymalny algorytm do detekcji i lokalizacji uszkodzeń na liniach przesyłowych, który jest niezależny od impedancji źródłowych i błędów pomiarowych.

Szereg prac dotyczy identyfikacji i klasyfikacji rodzaju uszkodzenia, które wykonywane jest na podstawie przetwarzania sygnałów, jakie zarejestrowano podczas pomiarów zjawiska ulotu. Przykładowo w pracy [1] autorzy zajmują się identyfikacją uszkodzeń w systemach przesyłowych. Opisują metody stosowane w celu ich lokalizacji z wykorzystaniem nieliniowego modelowania iskrzenia. Rozwiązanie autorów weryfikowano w układzie pomiarowym przy napięciu 500 kV. W pracy [5] autorzy przedstawiają metodę zautomatyzowanego rozpoznawania rodzaju i formy wzn, która pozwala na dokładne oszacowanie stanu izolacji wysokonapięciowych transformatorów mocy. Autorzy rejestrowali wzn przy użyciu anteny szerokopasmowej. Zdaniem autorów ta metoda jest czuła i odporna na zakłócenia elektromagnetyczne. Klasyfikacją wyładowań ulotowych występujących na izolatorach porcelanowych zamontowanych w wysokonapięciowych liniach przesyłowych zajmują się autorzy pracy [18], w której korzystając z metody rozpoznawania wzorca sygnałowego ulotu, uzyskano dokładność rozpoznawania wadliwych izolatorów na poziomie 87,5%. Wykorzystano urządzenia pomiarowe własnej konstrukcji, które zweryfikowano w sposób eksperymentalny na 76 izolatorach wsporczych. Autorzy korzystali również z cewki Rogowskiego o wysokiej czułości i wysokiej częstotliwości rzędu od 2 MHz do 20 MHz. W publikacji [57] autorzy podają metody identyfikacji dwóch typów wzn, które zostały wygenerowane na bazie zróżnicowanych parametrów. W pracy [64] autorzy stosują wielofalową entropię w celach klasyfikacji i rozpoznawania usterek linii przesyłowych, przy czym wykorzystują sieci neuronowe typu RBF (*ang. Radial Basis Function*), które wykorzystano do analizy 10 typów uszkodzeń. Na podstawie wyników pokazano,

że zastosowana metoda ma zdolność do efektywnego i skutecznego rozpoznawania i klasyfikacji różnych typów uszkodzeń linii przesyłowych. W pracy [69] przedstawiono metodę rozpoznawania wzorca uszkodzenia, która wymaga danych jedynie z jednego końca linii. Natomiast w pracy [78] do klasyfikacji uszkodzeń powstałych w liniach przesyłowych zastosowano wielorozdzielczą analizę falkową.

Zagadnienie monitorowania stanu technicznego urządzeń elektroenergetycznych oraz jakości zasilania w systemie przesyłowym stanowi bardzo istotny aspekt w prowadzonych obecnie pracach, co odzwierciedlone jest w literaturze. Przykładowo, w publikacji [79] autorzy stosują rekonfigurowalny przyrząd w celu monitorowania jakości zasilania w układach trójfazowych. Autorzy przedstawiają wyniki badań nad narzędziem korzystającym z różnych algorytmów w zależności od zastosowania, które mogłoby być stosowane do monitorowania parametrów elektrycznych trójfazowych układów zasilania. W pracy [80] przedstawiono eksperymentalne i symulacyjne wyniki monitorowania systemu izolacji transformatorów mocy w czasie rzeczywistym. Zdaniem autorów pomiary wnz są ważnym narzędziem służącym do oszacowania stanu technicznego transformatora mocy. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zaproponowana metoda detekcji ma wysoką czułość i może znaleźć szerokie zastosowanie w diagnostyce.

Wiele prac literaturowych dotyczy opracowywania nowych i doskonalenia istniejących metod pomiarowych. Autorzy w publikacji [85] przedstawiają metodę pomiaru wyładowań ulotowych występujących na statorze silnika wysokonapięciowego. Metoda polega na umieszczeniu silnika w całkowitej ciemności, a następnie przyłożeniu napięcia o wartości 115% napięcia nominalnego silnika i obserwacji promieniowania ultrafioletowego emitowanego przez wnz. W pracy [86] przedstawiono wyniki pomiarów prądu i wyładowań ulotowych przy użyciu elektrod typu phi, które zdaniem autorów jest efektywnym narzędziem do bezkontaktowego pomiaru wnz. Przeanalizowano wpływ czasu propagacji wyładowania w dwóch modelach: o wyższej rezystywności powierzchniowej (model typu H) i o niższej (model typu L). W pracy [94] przedstawiono wyniki pomiarów prądu wyładowania ulotowego, wykonanych przy zastosowaniu optycznego transduktora mikroprądowego i filtru niskoprzepustowego. Metodę tę autorzy polecają do testów przy wysokich i najwyższych napięciach. W pracy [96] przedstawiono wyniki badań linii przesyłowej wysokiego napięcia stałego pod kątem występujących na niej wyładowań ulotowych. W pomiarach wyładowań wykorzystano klatkę o wymiarach: 4m x 2m x 2m i system składający się z odbiornika promieniowania elektromagnetycznego, w tym ultrafioletowego. Autorzy zmierzili przy różnych napięciach: poziom szumu słyszalnego, poziomu interferencji radiowych i liczbę

fotonów ultrafioletowych. W pracy [100] przedstawiono wyniki pomiarów promieniowania wyładowań ulotowych powstających na urządzeniach elektroenergetycznych. Na podstawie analizy wyników pokazano, że fizyczny model wyładowania ulotowego może być zasymulowany poprzez użycie krótkiej anteny dipolowej, ponieważ oś anteny, zgodnie z zasadą superpozycji, zbiega się ze ścieżką, po której propaguje się wyładowanie ulotowe. W pracy [103] przedstawiono metodę kalkulacji natężenia pola elektrycznego pod liniami przesyłowymi wysokiego napięcia prądu stałego podwójnego obiegu. Autorzy porównują wyniki obliczeń z danymi pomiarami i stwierdzają, że wartości maksymalne oraz rozkłady boczne pola elektrycznego są dzięki ich metodzie możliwe do przewidzenia. Autorzy podkreślają, że istnieje wiele czynników, które mogą prowadzić do różnic między wynikami obliczeń, a wynikami pomiarowymi na linii przesyłowej. W pracy [109] autorzy omawiają kryteria detekcji wyładowań ulotowych przy pomocy promieniowania ultrafioletowego symulowanego w szczelinie powietrznej. W celu określenia kryteriów, w których warunkach wyładowania ulotowe stają się niebezpieczne, autorzy analizowali wyładowania przy użyciu kamery UV nagrywając wyładowania z różnych odległości. Obrazy z kamery zostały przeanalizowane przy pomocy autorskiej metody przetwarzania obrazu. Obszar wyładowania na obrazie był traktowany jako intensywność wyładowania ulotowego. Wyniki badania pokazały, że dla różnych typów wyładowań ich etapy rozwoju różnią się od siebie. Zdaniem autorów metoda detekcji promieniowania ultrafioletowego ma przewagę nad innymi ze względu na jej niewrażliwość na interferencje elektromagnetyczne. W pracy [88] omówiono aktualne trendy dotyczące metody pomiaru, diagnostyki i monitorowania, on-line jak i off-line, wzn występujących w urządzeniach wysokonapięciowych. Opisano technologie budowy czujników, ich rodzaje oraz sposoby rozpoznawania wzn.

W badaniach zmierzających do doskonalenia metod diagnostycznych coraz częściej wykorzystywane są metody modelowania komputerowego. W publikacji [3] autorzy przedstawiają model matematyczny umożliwiający przewidywanie zmian pojemnościowych trójfazowej linii przesyłowej powodowanych wyładowaniami ulotowymi. Omówione zostały podstawowe aspekty modelowania i symulacji linii przesyłowych, na których wystąpiło zjawisko wyładowania ulotowego. W pracy [6] autorzy symulują podwójny obwód linii przesyłowej o napięciu 400 kV przy użyciu programu ATP/EMTP (*ang. Alternative Transients Program/ElectroMagnetic Transients Program*). Aby zbadać wpływ wyładowań ulotowych powodowanych przepięciami zasymulowano różne warunki ich występowania. Bazując na tym modelu artykuł omawia dwa zjawiska przejściowe: przeskok wsteczny i uszkodzenie obudowy. W publikacji [7] autorzy omówili wyniki testowania funkcji przenoszenia dla części liniowej

modelu wyładowania ulotowego występującego na linii przesyłowej. Do analizy funkcji zastosowano przyborek System Identification Toolbox środowiska Matlab. Wyniki badań pokazują możliwości modelowania elementów nieliniowych używając symulatora EMTP-RV.

W publikacji [17] opisano wyniki badań zjawiska zachodzącego podczas generacji wyładowań ulotowych w sytuacji, gdy krople wody deszczowej spadają na linie wysokiego napięcia, wywołując wibracje. Autorzy wykonali symulacje numeryczne uwzględniające różne czynniki, w tym np. siłę pola elektrycznego, jego polaryzację, intensywność deszczu, prędkość wiatru. W symulacji uwzględniono także mechaniczne i elektryczne siły działające na linię. Według autorów wyniki symulacji znalazły potwierdzenie w danych dostępnych w literaturze. W publikacji [60] autorzy zajmują się doskonaleniem modelu wyładowania ulotowego napowietrznych wysokonapięciowych linii przesyłowych prądu przemiennego. Korzystają z programu ATP/EMTP w celu określenia modelu symulującego uszkodzenie w linii przesyłowej pracującej przy napięciu 1000 kV. Na podstawie wyników pokazano, że wyładowanie ulotowe wpływa na amplitudę i kształt fali propagującej po linii. Autorzy pracy [20] w badaniach nad zjawiskiem wyładowania ulotowego zmierzających do określenia szczegółowego profilu prądów i napięć na linii przesyłowej zastosowali numeryczne i analityczne metody.

Autorzy pracy [21] rozpatrywali wyładowania ulotowe jako kluczowy problem techniczny podczas projektowania i konstrukcji linii przesyłowej wysokiego napięcia prądu stałego. W celu zasymulowania tego zjawiska zastosowali pierścienie gradacji (*ang. grading rings*) na linii o napięciu 800 kV. Opierając się na obliczeniach numerycznych, wykorzystując program *Ansoft FEM* określają napięcia poszczególnych pierścieni, przy których występuje wyładowanie ulotowe.

Autorzy w publikacji [29] przedstawiają metodę modelowania wyładowania ulotowego stosując technikę TLM. Ich zdaniem algorytm jest skuteczny w przypadku modelowania efektów wyładowań, które są reprezentowane przez zwiększenie pojemności linii. W pracy [51] autorzy opisują wyniki badań, których celem było określenie wpływu rozmiaru pierścieni koronowych (*ang. corona rings*) na rozkłady pola elektrycznego wokół izolatora szklanego pracującego przy napięciu 132 kV. Rozkłady pola elektrycznego zostały obliczone za pomocą symulacji komputerowych wykorzystujących metodę elementów skończonych. Na podstawie wyników badań autorzy określili optymalne parametry pierścienia koronowego. Natomiast, w pracy [52] określono parametry i charakterystykę wyładowań ulotowych występujących na pierścieniach umieszczonych na kompaktowych liniach przesyłowych wysokiego napięcia o wartości 1000 kV. Badania zostały oparte na symulacjach numerycznych wykorzystujących

metodę elementów skończonych, trójwymiarowej symulacji pola elektrostatycznego. Opierając się na wynikach analizy numerycznej wybrano cztery rodzaje pierścieni gradacji. Zdaniem autorów wyniki badań mogą stanowić wartości referencyjne do określenia charakterystyki wyładowań ulotowych w celach optymalizacyjnych. W pracy [56] przedstawiono wyniki analiz powypadkowych przekaźników linii przesyłowych. Analiza została zweryfikowana na podstawie wyników symulacyjnych uzyskanych z programów ATP/EMTP. Dzięki zastosowanym metodom możliwe było zlokalizowanie uszkodzenia. W pracy [61] przedstawiono wyniki badań rozkładów pola elektrycznego wokół wysokonapięciowych linii przesyłowych prądu przemiennego o napięciu 1000 kV. Na podstawie wyników symulacyjnych, w których zastosowano metodę elementów skończonych, zaproponowano charakterystykę rozkładów pola elektrycznego. Zdaniem autorów wyniki badań mogą być wykorzystane w procesie konstruowania wysokonapięciowych linii przesyłowych.

W pracy [91] autorzy zajmują się modelowaniem wyładowania ulotowego na linii przesyłowej, która doznała uderzenia piorunem. Metoda wykorzystywana przez autorów to FDTD (*ang. Finite-Difference Time-Domain*), przy pomocy której dokonano także kalkulacji pulsacji elektromagnetycznych. Autorzy w publikacji [105] omawiają zastosowanie wysokoczęstotliwościowego czujnika służącego do pomiaru prądu płynącego przy wyładowaniach ulotowych przy wysokim napięciu stałym. Opierając się na metodzie elementów skończonych autorzy przeprowadzają badania symulacyjne wyładowania ulotowe przy napięciu 1200 kV. Zdaniem autorów czujnik jest odporny na zakłócenia zewnętrzne takie jak wibracje i zmiany temperatury i może zostać zastosowany do pomiaru prądu przy wyładowaniach ulotowych. W pracy [107] autorzy wykorzystali metodę odwrotnego rozproszenia (*ang. inverse scattering*) w celu diagnostyki niewielkich usterek w liniach przesyłowych. Autorzy posługują się obliczeniami numerycznymi i symulują bezstratną linię przesyłową, na której występują drobne uszkodzenia. Metoda odwrotnego rozproszenia efektywnie odzyskuje i wyrównuje profile impedancji współczynników odbicia. Zdaniem autorów takie rozwiązanie stanowi wypełnienie luki między badaniami przy użyciu instrumentów reflektometrycznych i matematycznych. W publikacji [74] autorzy badają wyładowania ulotowe o krótkim czasie pulsowania występujące na dwużyłowej, 6-metrowej linii przesyłowej. Układ składał się z generatora impulsu o czasie sygnału 5-ns i napięciu 100 kV, mierników napięcia i prądu, a także fotonowielaczy. Wyniki badań przeprowadzonych w programie PSPICE pokazują, że wyładowanie było wysoce asymetryczne gdy jeden z terminali generatora był uziemiony, co zdaniem autorów spowodowane było asymetrią pola elektrycznego.

Wiele dostępnych prac literaturowych dotyczy opracowywania nowych metod wykorzystujących zaawansowane algorytmy przetwarzania cyfrowego sygnałów i elementy sztucznej inteligencji. Przykładowo, w pracy [54] do detekcji i klasyfikacji defektów w liniach przesyłowych wysokiego napięcia zastosowano największą wartość pojedynczej fali i normę euklidesową, przy czym zaproponowano nowy algorytm oparty na DWT (*ang. Discrete Wavelet Transform*) i SVD (*ang. Singular Value Decomposition*). Autorzy przeprowadzili kilka symulacji uszkodzeń linii pojedynczej i trzyczłonowej przy różnych wartościach impedancji wykorzystując oprogramowanie DlgSILENT Power Factory. W pracy [82] rozpatrywane jest zagadnienie detekcji i klasyfikacji uszkodzeń w liniach przesyłowych w oparciu o transformacje falkowe i sztuczne sieci neuronowe. Zdaniem autorów dzięki tym metodom możliwe jest odróżnienie uszkodzeń od innych zaburzeń jakości napięcia, takich jak spadki napięcia i przejścia oscylacyjne. Ponadto zwracają uwagę, że zła klasyfikacja usterek może mieć miejsce także w przypadku gdy kąt zakresu, rezystancja usterki i inne parametry różnią się od tych, które wprowadzono do modelu. W pracy [99] autorzy opisują wykonane pomiary i analizy pól elektromagnetycznych emitowanych przez wyładowania ulotowe jakie mogą mieć szkodliwy wpływ na urządzenia mikroelektroniczne. Autorzy zaprojektowali system służący do symulacji wyładowań ulotowych na obiektach przestrzennych. Ponadto sporządzili charakterystykę pól elektromagnetycznych przy użyciu przekształceń czasowo-częstotliwościowych i metod analizy falkowej. W pracy [46] omówiono zagadnienie dotyczące detekcji wyładowań ulotowych za pomocą przekształceń i analizy widmowej oraz metody RF (*ang. Radio Frequency*).

Zdaniem autorów oprócz metod detekcji wyładowań takich jak optyczna i ultrasoniczna, najbardziej obiecującą jest metoda RF. Autorzy zwracają uwagę na rozróżnienie sygnału generowanego przez wnz od szumu, który występuje w środowisku. Badanie przeprowadzono w środowisku kontrolowanym, wolnym od szumów. Celem badań było opracowanie systemu umożliwiającego monitorowanie różnych typów wnz. Symulacje wyładowań ulotowych przeprowadzono dla różnych wartości napięć (1-4 kV) i różnych wartości ciśnień (11-101,3 kPa). W publikacji [47] autorzy zajmują się detekcją oraz klasyfikacją uszkodzeń w liniach przesyłowych przy użyciu analizy funkcjonalnej i narzędzi sztucznej inteligencji. Autorzy przyjmują, że linia przesyłowa to najbardziej wrażliwy element systemu przesyłowego ze względu na jej rozległą konfigurację (setki km długości i duża ilość słupów). Zaproponowali oni nowy model reprezentujący fazy linii przesyłowej, który zdaniem autorów, wykrywa usterki relatywnie szybko i dokładnie. W pracy [68] omówiono metody detekcji i lokalizacji usterek linii przesyłowych przy użyciu pomiarów PMU (*ang. Phasor Measurement Unit*).

Do obliczeń związanych z usterkami autorzy skorzystali z przekształceń i transformacji Fouriera. Zdaniem autorów zaproponowana metoda jest w stanie określić gdzie dokładnie, wzdłuż całej linii przesyłowej znajduje się usterka. W pracy [23] autor zajmuje się systemem ochrony linii przesyłowych prądu przemiennego, w tym TCSC (*ang. Thyristor-Controlled Series Compensator*) i statycznym kompensatorem synchronicznym. Autor proponuje rozwiązanie korzystające z algorytmów SVM (*ang. Support Vector Machines*).

Zdaniem autora proponowana metoda daje optymalne rezultaty w szybszym czasie i przy mniejszej ilości próbek niż w przypadku zastosowania sieci neuronowych i logiki rozmytej. W pracy [28] rozpatrywany jest efekt szumu wyładowania ulotowego rejestrowanego przy użyciu bezprzewodowej sieci sensorów do monitoringu linii przesyłowych. W analizach zastosowano model Markova-Middletona.

Na podstawie wyników badań, analiz i symulacji wykazano, że sygnał wyładowania ulotowego wywiera znaczący wpływ na działanie sieci bezprzewodowych i nie powinno się go ignorować. W pracy [11] zastosowano dwukanałowy system detekcji i monitoringu sygnałów w zakresie ultrafioletu (240-280 nm) emitowanych przez wyładowania ulotowe w urządzeniach elektroenergetycznych. W celu zlokalizowania wyładowania autorzy wykorzystali algorytm fuzji obrazu przestrzennego (*ang. space image fusion*), który umożliwia zwiększenie skuteczności i poziomu dokładności wykrywania wyładowań ulotowych. Praca [53] dotyczy problematyki detekcji uszkodzeń w liniach przesyłowych, a w szczególności przedstawiono w niej opracowany przez autorów algorytm bazujący na ukrytych modelach Markova (*ang. Hidden Markov Models*). Zdaniem autorów rozwiązanie może być zastosowane do detekcji uszkodzeń również na innych komponentach sieci np. transformatorach i przełącznikach. W pracy [72] omówiono detektor usterek i selektor uszkodzonej fazy dla linii przesyłowych pracujący w oparciu o metodę ACUSUM (*ang. Adaptive Cumulative Sum Method*). Algorytm ten zdaniem autorów może wykryć usterki o niedużej wartości i wysokich rezystancjach. W publikacji [89] opisano ulepszony algorytm służący do lokalizowania wielomiejscowych uszkodzeń w liniach przesyłowych skompensowanych pojemnościowo i sterowanych tyrystorami.

Działanie metody, która korzysta ze sztucznej sieci neuronowej, zostało zweryfikowane eksperymentalnie w szerokim zakresie parametrów takich jak: rodzaj usterki, umiejscowienie, rezystancja, przy czym błąd mieścił się w zakresie 0,001-1%. W pracy [98] w celu diagnostyki uszkodzeń wysokonapięciowych linii przesyłowych podjęto próbę dopasowania kształtu fali przy użyciu opracowanego przez autorów algorytmu HS (*ang. Harmony Search*). W pracy [101] w celu podnoszenia niezawodności linii przesyłowych, klasyfikacji i lokalizacji usterek

autorzy zastosowali model rozmyty. Zaproponowana technika, zdaniem autorów, umożliwia detekcję, lokalizację i identyfikację fazy, w której nastąpiło wyładowanie i jest mniej skomplikowana, przez co przewyższa inne metody oparte na sztucznej inteligencji np. sztuczne sieci neuronowe, SVM (*ang. Support Vector Machines*), DT (*ang. Decision Tree*).

Szereg prac literaturowych dotyczy badania wpływu na wyładowanie ulotowego różnych czynników zewnętrznych w tym parametrów technologicznych urządzenia, wpływu warunków pogodowych jak i zanieczyszczeń. Na przykład w pracy [8] autorzy stosują kombinacje płytek o różnej grubości, umieszczonych na różnych odległościach w celu generacji wyładowań ulotowych.

Ich celem było uzyskanie silnego pola elektrycznego, które z kolei powoduje generację bardziej efektywnych wzn. W pracy [9] autorzy badają użytkowane od 30 lat linie przesyłowe pracujące przy napięciu 500 kV, przy czym ich celem jest zbadanie wpływu na wyładowania ulotowe chropowatości powierzchni linii. Badania wykazały, że chropowatość ma znaczący wpływ na wyładowanie, decyduje o napięciu, przy którym ono wystąpi, a także ma wpływ na słyszalny i radiowy szum powstający wskutek wyładowania. W pracy [10] autorzy stosują przenośną klatkę służącą do wywoływania wyładowań ulotowych w celu zbadania zależności wysokości (od 23 do 40 m) na napięcie, przy którym na liniach przesyłowych wysokiego napięcia wystąpi wyładowanie ulotowe. Fotony wydzielone przez wyładowanie zostały zmierzone przy użyciu aparatu służącego do detekcji ultrafioletu. Autorzy w publikacji [27] zajmują się wpływem warunków atmosferycznych na wyładowania ulotowe w urządzeniach wysokiego napięcia. Opisują zjawisko wyładowania i jego przebieg w różnych warunkach takich jak: deszcz, zawilgocenie, kurz, piasek, sucha pogoda, które mogą być przyczyną przepięć. Ponadto autorzy proponują nowy model trójfazowej linii przesyłowej uwzględniający przejściowe wyładowania ulotowe.

W pracy [83] autorzy przedstawiają skonstruowany przez nich model wyładowania ulotowego występującego w warunkach burzowych. Ich celem było umożliwienie symulowania procesu powstawania takiego wyładowania i zbadanie jego charakterystyki. Autorzy pracy [33] zaprezentowali wyniki obserwacji mechanizmu wzn w różnych warunkach ciśnieniowych w niejednostajnym polu elektrycznym. Wpływ ciśnienia został obliczony dla różnych napięć, odległości między elektrodami i dla różnych kształtów elektrod. Wyniki badań mogą, zdaniem autorów, być zastosowane do diagnostyki urządzeń z izolacją gazową pracującą przy podwyższonym ciśnieniu. Autorzy w pracy [24] badają wyładowania ulotowe w modelach linii przesyłowych w zależności od częstotliwości napięcia fazowego. Linię przesyłową zaprezentowano jako kaskadę obwodów typu pi i zależności częstotliwości

od parametrów wzdłużnych wraz z połączonymi szeregowo równolegle rezystorami i cewkami. W celu zademonstrowania dokładności metody przedstawiono wyniki symulacji 10-kilometrowej linii przesyłowej. W publikacji [66] autorzy badają wpływ zanieczyszczeń obecnych na przewodniku wysokiego napięcia prądu stałego i wyznaczają charakterystyki wyładowań ulotowych.

Pomiary wyładowań wykonywano w klatce laboratoryjnej, przy czym posłużono się różnymi zanieczyszczeniami: sól, kaolin i węgiel, aby zbadać przepływ jonów i słyszalny szum powstający wskutek wyładowań. Wyniki badań wskazują na to, że zabrudzenia na powierzchni przewodnika mogą zwiększyć przepływ jonów i słyszalny szum. Charakterystyki wyładowań różniły się w zależności od zanieczyszczeń i polaryzacji napięcia. Wpływ obwodów typu pi i obwodów złożonych z równolegle ułożonych rezystorów i cewek na wyładowania ulotowe, emitowane w liniach przesyłowych został przebadany w pracy [59]. W publikacji [71] autorzy przedstawiają technikę do obliczania poziomów interferencji elektromagnetycznych spowodowanych wyładowaniami ulotowymi na wysokonapięciowych liniach przesyłowych. Przeanalizowali wpływ długości i średnicy linii oraz konfiguracji na emitowane wyładowania. Na podstawie uzyskanych rezultatów autorzy wywnioskowali, że konfiguracja linii nie ma znaczącego wpływu na poziom interferencji elektromagnetycznych. Natomiast wraz ze wzrostem długości linii, wartość szczytowa wyemitowanego pola EM wzrasta, przy czym czas trwania pulsowania pozostaje niezmienny. W pracy [81] autorzy badają zależność między przyłożonym napięciem, a ilością fotonów promieniowania ultrafioletowego wyemitowanych podczas wyładowania ulotowego w miejscu usterki linii przesyłowej, przy czym badane są różne typy uszkodzeń. Zdaniem autorów zależność między promieniowaniem ultrafioletowym wydzielonym w trakcie wystąpienia wyładowania ulotowego, a przyłożonym napięciem przemiennym można opisać funkcją kwadratową, co ma potencjał aplikacyjny w procesie detekcji wyładowań ulotowych.

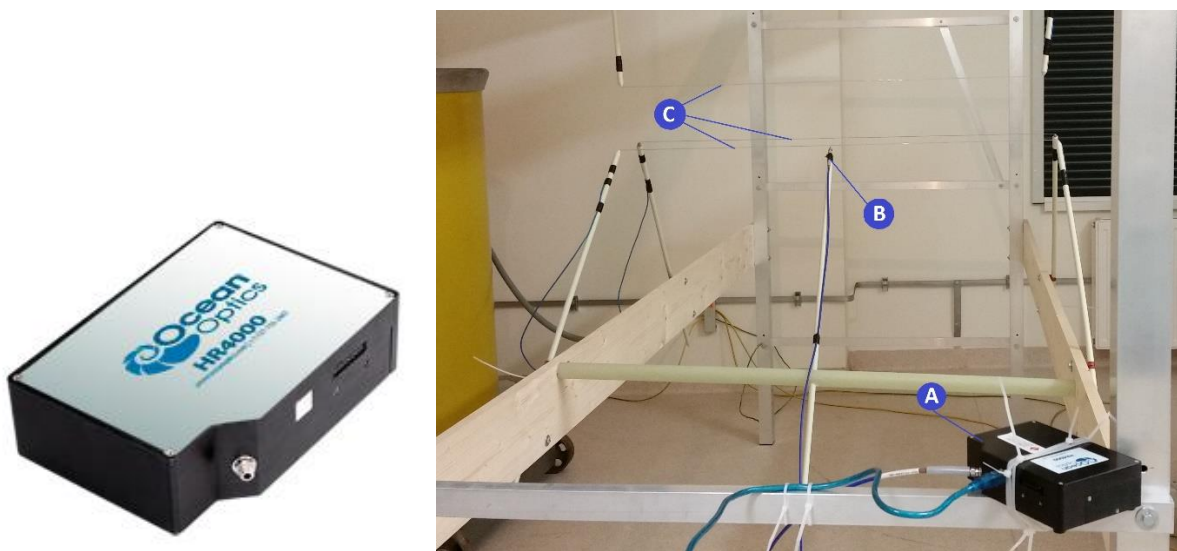
Ważne pozycje literaturowe odnoszące się do rozpatrywanej problematyki stanowią publikacje promotora pracy, tj. Pawła Frącza [12-16, 35-45, 84] obejmujące analizę i wykorzystanie widm optycznych w diagnostyce układów wysokonapięciowych.

5. Metrologiczne możliwości detekcji i pomiarów widm emisyjnych

5.1. Spektrofotometr

Do prowadzenia realizowanych w ramach dysertacji pomiarów w zakresie widm emitowanych przez wzn występujące na linii elektroenergetycznej wybrano spektrofotometr optyczny firmy Ocean Optics typ HR4000. Zasada działania spektrofotometru HR4000 (rys. 5.1) przedstawiona jest schematycznie na rys. 5.2.

Światło wpada przez specjalny łącznik SMA 905 (1) i zostaje przekazane do włókien światłowodowych poprzez szczelinę, w postaci apertury wykonanej w ciemnym materiale (2). Poprzez regulację wielkości szczeliny reguluje się ilość wpadającego światła oraz określa rozdzielczość widmową. Światło przedostające się do środkowej części urządzenia, przechodzi przez filtry (3) wąsko i szerokopasmowe. Kolejnym elementem jest zwierciadło kolimacyjne (4), które odbija światło i kieruje je na siatkę (5) powodującą jego dyfrakcję.

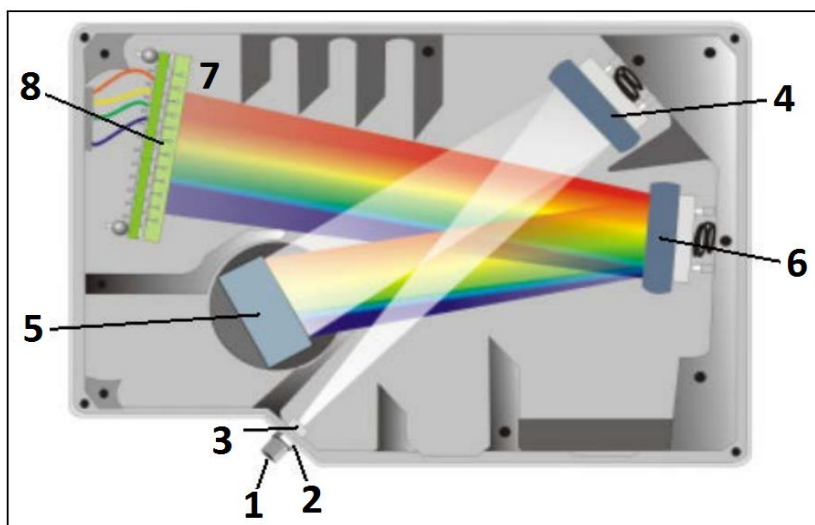


Rys. 5.1 Po lewej: ogólny widok spektrofotometru firmy Ocean Optics typ HR4000. Po prawej: sposób montażu spektrofotometru na stanowisku badawczym (A – spektrofotometr, B – końcówka światłowodu transmitującego sygnał optyczny do spektrofotometru, C – przewody modelu linii elektroenergetycznej). [Zdjęcie własne].

W zależności od gęstości rowków dyfrakcyjnych, możliwe jest dopasowanie zakresu i rozdzielczości rejestrowanych długości fal. Rozszczerzone światło skupiane jest w soczewce skupiającej (6) i kierowane na detektory CCD Toshiba TCS1304AP (8). W urządzeniu mogą być wbudowane soczewki detektorów L2 (7), które mają na celu poprawę efektywności

poprzez redukcję efektów rozproszenia – jest to opcja dostępna u producenta. Każdy piksel detektora CCD odpowiada długości fali, która w niego uderza, reagując w odpowiedzi cyfrowym impulsem. 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. Urządzenie współpracuje poprzez port USB z oprogramowaniem komputerowym rejestrującym wyniki oraz wizualizującym otrzymane efekty pomiaru. Oprogramowanie komputerowe służy również do programowania niektórych parametrów urządzenia – np. określania czasu integracji.

W tabelicy 5.1 zestawiono podstawowe parametry techniczne zastosowanego w pomiarach spektrofotometru Ocean Optics typ HR4000. Analiza zarejestrowanych danych odbywała się w środowisku programistycznym Matlab.



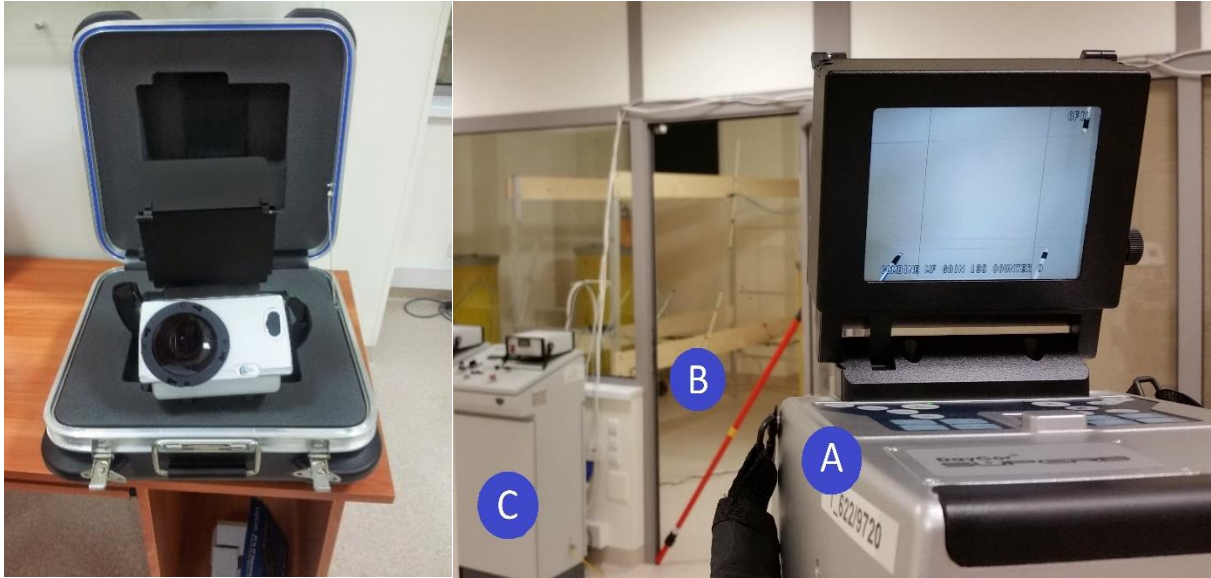
Rys. 5.2 Ideowy schemat działania spektrofotometru Ocean Optics typ HR4000. [Instrukcja obsługi urządzenia].

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

5.2. Kamera UV

Drugim urządzeniem wykorzystanym do prowadzenia pomiarów widm emitowanych przez wnz występujące w linii elektroenergetycznej była kamera UV DayCor Superb (rys. 5.3) firmy OFIL Systems. W czasie pomiarów kamera była zamocowana na statywie fotograficznym w odległości 5 metrów od modelu badanej linii elektroenergetycznej. Wykorzystanie statywu fotograficznego umożliwiło optymalne ustawienie kamery w stosunku do badanego obiektu.



Rys. 5.3 Po lewej: zdjęcie kamery UV DayCor Superb. Po prawej: ogólny widok ekranu kamery podczas rejestracji widm emisyjnych generowanych przez wnz (A – kamera UV, B – stanowisko do modelowania linii elektroenergetycznej, C – pulpit sterujący transformator probierczy). [Zdjęcie własne].

Wykorzystana do badań kamera DayCor Superb jest profesjonalną kamerą przeznaczoną między innymi do monitoringu sieci elektroenergetycznych średnich, wysokich i najwyższych napięć. Pomiar opiera się na zliczaniu impulsów generowanych przez detektory światła, przy czym w kamerze wbudowane są dwa przetworniki: jeden z nich to detektor reagujący na fotony z zakresu: UV (250-280 nm) zaś drugi to standardowy przetwornik CCD reagujący na światło widzialne (380-780 nm). Uzyskaną liczbę zliczonych fotonów z zakresu UV oprogramowanie urządzenia nakłada na zdjęcie widzialne badanego elementu, które otrzymywane jest przy użyciu standardowej matrycy czulej na światło widzialne. Po nałożeniu jednego obrazu na drugi powstaje obraz wskazujący zarówno lokalizację miejsca występowania wnz jak i intensywności wnz. Zastosowane w kamerze elementy toru optycznego zostały zoptymalizowane pod kątem wizualizacji efektu wnz w świetle widzialnym. Podczas pomiarów otrzymywane obrazy były prezentowane na ekranie kamery oraz rejestrowane na karcie pamięci w celu poddania ich dalszej obróbce. Analiza zarejestrowanych danych odbywała się w środowisku programistycznym Matlab.

W tablicy 5.2 zestawiono podstawowe parametry techniczne zastosowanej w pomiarach kamery UV DayCor Superb.

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	Tryb pracy	widzialny / UV / łączony	-
7	Temperatura pracy i przechowywania	20 ... +55	°C

5.3. Ograniczenia metrologiczne i techniczne poszczególnych metod

Każda z zastosowanych metod pomiarowych ma swoje ograniczenia wynikające ze specyfiki obiektu pomiarowego, mierzonych wielkości czy wynikających z zasad BHP. W przypadku pomiarów spektrofotometrem, pierwszym ograniczeniem była długość światłowodu i warunki bezpieczeństwa. Ze względu na szeroki zakres pomiarowy rejestrowanych widm (200 – 1100nm) mogły być zastosowane tylko światłowody mające odpowiednio niskie tłumienie, szczególnie w zakresie ultrafioletu. Jeden z nich miał długość 1m zaś drugi 2m. Po zbudowaniu stanowiska pomiarowego i próbach rejestracji widm wnz zdecydowano się na światłowód o długości 2m. Użycie światłowodu o długości 1m mogło zagrażać przebiciem z badanego przewodu zasilanego z transformatora probierczego do obudowy spektrofotometru, galwanicznie połączonego z komputerem rejestrującym poprzez kabel USB. Światłowód o długości 2m miał z kolei nieco większe tłumienie co mogło wpływać na rejestrację najsłabszych sygnałów, szczególnie w zakresie UV. Problemem było również ustalenie optymalnego czasu integracji (zliczania) spektrofotometru. Zbyt długi czas mógł doprowadzić do nasycenia przetwornika CCD co z kolei nie było korzystne z punktu widzenia rejestracji najsilniejszych składowych widma i niepotrzebnie wydłużał pomiar, zaś zbyt krótki powodował że niektóre składowe widma nie były widoczne. Ze względu na to, że jednym z wyników badań miało być porównanie widm emisyjnych wnz dla różnych materiałów, na których wnz występują, przyjęto że czas integracji będzie dla wszystkich pomiarów jednakowy, pomimo że nie zawsze optymalny. W wyniku prób określono ten czas na 11 s.

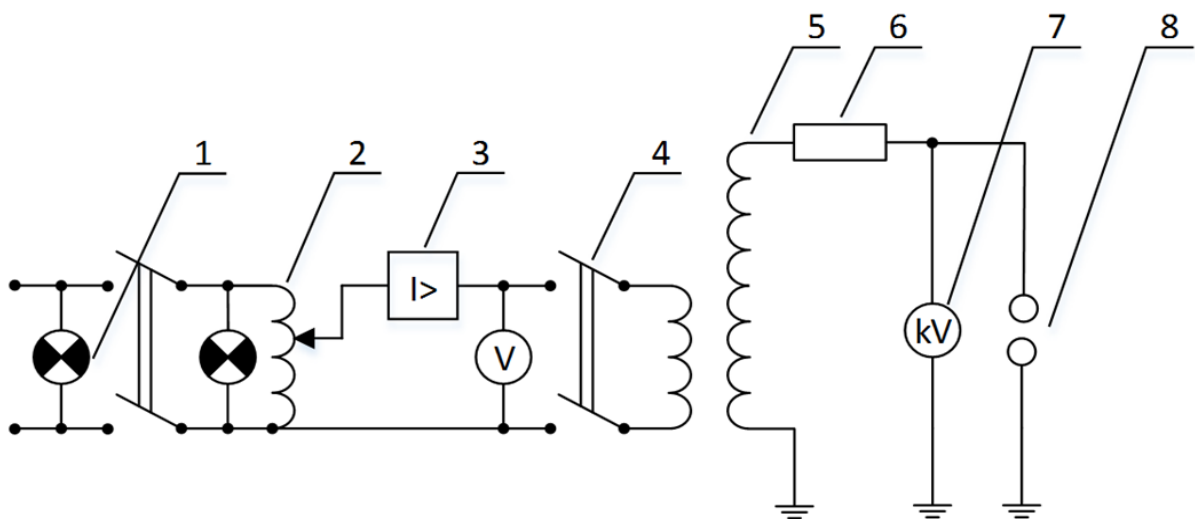
Ograniczenia metrologiczne kamery były zupełnie inne. Ze względu na sposób wykonywania pomiaru warunki związane z utrzymaniem BHP były łatwe do spełnienia – pomiar odbywał się z odległości 5 metrów. Ograniczeniem i problemem do określenia

na początku było ustawienie wzmocnienia układu tak, aby przy najintensywniejszych wnz następowało prawidłowe zliczanie zarejestrowanych fotonów z zakresu UV a jednocześnie aby jak najwcześniej możliwe było określenie napięcia początkowego ulotu U_0 . W drodze eksperymentów określono wzmocnienie (parametr GAIN) kamery na 130 jednostek. Kamera UV obserwująca element, na którym występują wnz, posiada możliwość rejestrowania ilości zliczeń tylko w określonym, zdefiniowanym obszarze podlegającym obserwacji. Pozwala to na wyeliminowanie niepożądanych sygnałów stanowiących zakłócenie. Taki zdefiniowany obszar określony jest jako „okno”. Zastosowana kamera UV DayCor Superb posiada zdefiniowane trzy okna pomiarowe – użytkownik podczas przygotowywania kamery do pomiaru wybiera jedno z nich. W przypadku pomiarów wnz występujących na modelu linii trójfazowej określone zostało okno, w którym kamera dokonuje zliczeń zarejestrowanych fotonów z pasma UV, na okno nr 3. Ograniczeniem takiej metody pomiaru jest też fakt, że prezentowane na ekranie kamery ilości zliczeń nie oznaczają wprost ilości zarejestrowanych fotonów a tylko pewną, umowną liczbę reprezentującą uśrednioną wartość zliczeń z czterech ostatnich pomiarów. Na ekranie kamery liczba ta jest aktualizowana co 4 sekundy. Ograniczeniem jest także niemożliwość do określenia konkretna składowa widma zliczonego impulsu. Przetwornik UV kamery reaguje jednakowo na wyładowania, które zawierają elementy widma w zakresie 250 – 280 nm, tak więc dzięki kamerze możemy potwierdzić, że takie widmo występuje podczas badanych wnz. Możemy także porównać intensywność wnz do wzorca i na tej podstawie określić czy wnz jest groźne dla przewodu.

6. Pomiary widm emisyjnych wyładowań ulotowych generowanych w modelu linii elektroenergetycznych z trójkątnym układem przewodów

6.1. Charakterystyka układu probierczego wysokiego napięcia

Obiekt jakim był badany model linii elektroenergetycznej zasilany był z trzech niezależnych jednofazowych układów probierczych wytwarzających wysokie napięcie przemiennie. Każdy układ probierczy składał się z pulpitu sterowniczego i transformatora probierczego wyposażonego w rezystor ochronny. Schemat pojedynczego jednofazowego układu probierczego prezentuje rys. 6.1.



Rys. 6.1 Schemat wysokonapięciowego układu pomiarowego: 1 - lampka kontrolna, 2 - regulator napięcia, 3 - zabezpieczenie nadprądowe, 4 - przełącznik, 5 - transformator probierczy, 6 - rezystor ochronny, 7 - woltomierz elektrostatyczny, 8 - badany obiekt.

W badanym układzie zastosowano trzy jednakowe jednofazowe układy probiercze, przy czym każdy z nich zasilany był z innej fazy sieci trójfazowej. Po stronie wtórnej transformatora dostępne zatem były wysokie napięcia fazowe oraz międzyfazowe. Niezależna regulacja napięcia na każdym z pulpików była z jednej strony utrudnieniem podczas prowadzenia badań ale też pozwalała na badanie innych zjawisk zachodzących w linii trójfazowej z niesymetrycznym zasilaniem. Ogólny widok pulpików sterowniczych przedstawia rys. 6.2.



Rys. 6.2 Widok trzech pulpity sterowniczych produkcji ZWARPOL wykorzystywanych do badań. [Zdjęcie własne].

W badaniach zastosowano trzy jednakowe transformatory probiercze o przekładni 220/110000V. Podstawowymi parametrami transformatora probierczego 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 iloczynem napięcia znamionowego i prądu znamionowego pobieranego z układu w sposób ciągły. Określa się także 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. W zastosowanym układzie probierczym odpowiednie i bezpieczne warunki pracy gwarantował pulpit sterujący, zaś pomiary odbywały się w układzie, w którym jedynym obciążeniem transformatorów probierczych był ulot z linii elektroenergetycznej. Ogólny widok na całe stanowisko pomiarowe przedstawia rys. 6.3.



Rys. 6.3 Widok ogólny na stanowisko pomiarowe. Widoczne są trzy transformatory probiercze oraz pręty z włókna szklanego służące do mocowania przewodów badanej linii trójfazowej. [Zdjęcie własne].

6.2. Dobór deskryptorów charakteryzujących rejestrowane widma emisyjne

Poszczególne urządzenia pomiarowe – kamera UV i spektrofotometr – rejestrowały intensywność występujących zjawisk. W przypadku kamery UV była to intensywność wnz prezentowana jako liczba zliczeń zależna od intensywności występowania wnz. Ze względu na fakt, że przetwornik UV kamery rejestruje widmo w zakresie 250-280 nm wskaźnikiem (deskryptorem) brany pod uwagę było występowanie widma we wspomnianym zakresie co uwidaczniało się w występowaniu zliczeń (przy braku widma w zakresie 250-280 nm licznik kamery pokazywał zero) oraz intensywność występowania widma 250-280 nm określana ilością zliczeń.

W przypadku spektrofotometru wskaźnikiem rejestrowanych widm była intensywność zarejestrowanego sygnału dla każdej z długości fal z zakresu pomiarowego spektrofotometru. W tym przypadku konieczne było ustalenie progu intensywności powyżej którego uznaje się, że dane widmo w sygnale występuje. Pomocnym elementem do wyznaczenia progu było zarejestrowanie tła czyli widm, szumów własnych spektrofotometru w celi pomiarowej przy braku wyładowań ulotowych. Taki pomiar był realizowany dla każdego punktu pomiarowego przy wyłączonych transformatorach. Dalsza analiza zarejestrowanych sygnałów pozwoliła na określenie intensywności poszczególnych widm podczas występowania wnz.

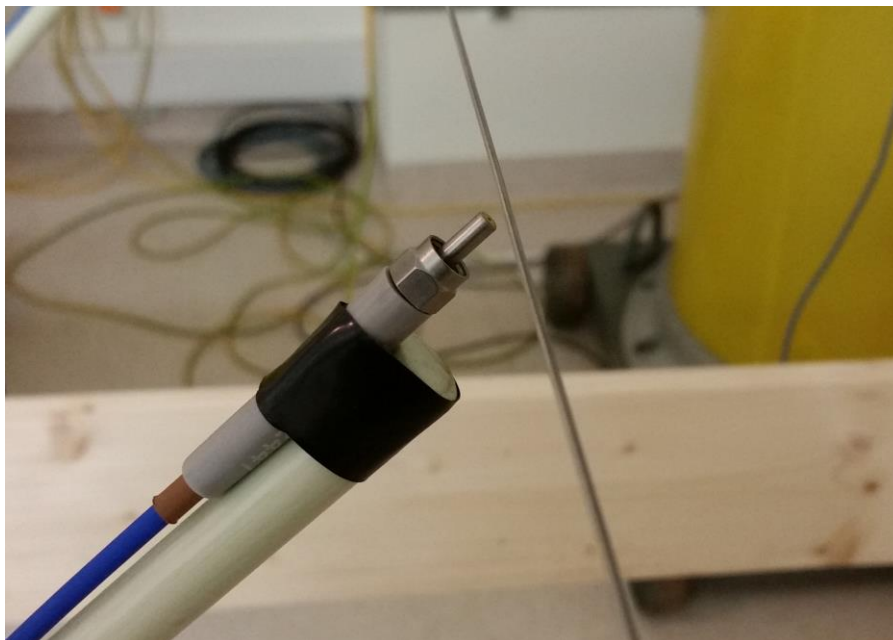
6.3. Metodyka i zakres przeprowadzonych pomiarów

Wszystkie pomiary wykonywane były w zaciemnionym pomieszczeniu laboratorium Techniki Wysokich Napięć Politechniki Opolskiej. Rejestrację pojedynczego sygnału optycznego z wykorzystaniem kamery UV wykonano w czasie około 3 minut, w trakcie których dokonywano zapisu 30 wartości określających liczbę zliczeń prezentowanych na wyświetlaczu kamery. Pomiary wykonywano dla danego materiału z którego wykonany był model linii elektroenergetycznej. Dla przyjętej odległości d między przewodami linii wyznaczone było napięcie U_0 i U_p a następnie rejestrowana była intensywność wnz dla wartości napięć od napięcia U_0 aż do wartości 90% napięcia U_p ze skokiem co 10%. Szczególnej obserwacji podlegał moment pojawienia się ulotu zarejestrowany przez kamerę UV a niewidoczny dla oka ludzkiego. Pomiar z użyciem kamery UV prezentuje rys. 6.4.



Rys. 6.4 Widok ogólny stanowiska pomiarowego podczas wykonywania pomiaru kamerą UV. Widoczna oświetlona celka w czasie pomiarów była zaciemniona w celu umożliwienia prawidłowej rejestracji widm przez spektrofotometr – została oświetlona specjalnie do wykonania tego zdjęcia (A – kamera UV z widocznym ekranem pozwalającym na obserwację pomiaru, B – stanowisko do modelowania linii trójfazowej – widok przez otwarte drzwi do celki). [Zdjęcie własne].

Jednocześnie z rejestracją intensywności wnz przez kamerę UV w tych samych punktach pomiarowych odbywał się pomiar występujących w tym czasie widm emisyjnych za pomocą spektrofotometru. Na rys. 6.5 przedstawiono wypozyjonowanie końcówki światłowodu względem przewodu emitującego wnz.



Rys. 6.5 Widok końcówki światłowodu spektrofotometru służącej do obserwacji widm emisyjnych wnz. [Zdjęcie własne].

Zakres badań obejmował wykonanie pomiarów dla modeli linii zbudowanych z różnych materiałów przewodzących. Dla każdego materiału budowany był model linii trójprzewodowej z trójkątnym układem przewodów (trójkąt równoboczny) a następnie ustalana była odległość między przewodami w zakresie od 8 do 36 cm co 2 cm. Dla każdej odległości wyznaczano wartości U_0 i U_p a następnie wykonywano jednoczesną rejestrację widm za pomocą spektrofotometru i kamery UV. Zarejestrowane wyniki poddawane były dalszej analizie.

7. Analiza i interpretacja wyników pomiarów uzyskanych metodą spektrofotometrii

7.1. Numeryczne metody i programy wykorzystane w analizie i interpretacji zarejestrowanych wyników

Do analizy uzyskanych sygnałów wykorzystano środowisko programistyczne MATLAB. Poniżej przedstawiono przykładowe listingi dwóch procedur obliczeniowych.

- Generowanie obrazu intensywności i struktury widma emisyjnego emitowanego przez ulot:

```
clear all
clc

home_matlab = pwd;
cd ..
temp = pwd;
source = [temp '\maty\'];
folder_rysunki = [ temp '\obrazy_intensywnosci_spectro\'];

nazwa_ukladu = {'AL', 'AlMg5', 'AlSi5', 'FeCu', 'MIG308LSi'};

font_ = 10;
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
figure('Position', [100 scrsz(4)/2-100 scrsz(3)/2 scrsz(4)/3]);
hold on; grid on; grid minor;

for NrUkladu = 4:5

    clear lista_plikow
    cd(source);
    cd(nazwa_ukladu{NrUkladu});
    lista_plikow = dir;
    %     for NrPliku = 3 : length(lista_plikow);
    for NrPliku = length(lista_plikow);
        cd(source);
        cd(nazwa_ukladu{NrUkladu});
        load(lista_plikow(NrPliku).name);

        folder_rysunki_temp = [ folder_rysunki nazwa_ukladu{NrUkladu}];
        cd(folder_rysunki_temp);
        mkdir(lista_plikow(NrPliku).name(1:4));
        cd(lista_plikow(NrPliku).name(1:4));

        [L, tt]=size(dane);
        for j=round(L/1.1):L
            temp = cell2mat(nazwaPliku(1,j));

            cla;
            nazwaPomiaru = [nazwa_ukladu{NrUkladu} '_'
lista_plikow(NrPliku).name(1:4) '_' temp(21:22) '_' num2str(j) ];
            plot(czestotliwosci, dane(j,:));
            xlabel('Długość fali (nm)', 'fontsize', font_);
```

```

        ylabel('Intensywność (-)', 'fontsize', font_); grid on; grid minor;
        set(gca, 'fontsize', font_);
        legend(['\itU\rm=0,' num2str(str2num(temp(21:22)))
'\itU\rm_{p}']); % num2str(index_napiec)
        set(gca, 'ylim', [0 max(dane(j,:))*1.1]);
        set(gca, 'xlim', [min(czestotliwosci) max(czestotliwosci)]);
        set(gcf, 'PaperPosition', [1 1 15 5]); %dopasowanie tego co sie
potem wydrukuj
        print(gcf, '-djpeg', '-r600', nazwaPomiaru);
    end

end

end

```

- Generowanie zestawienia zbiorczego intensywności widma dla $I > 1600$, zarejestrowanych dla różnych wartości napięć:

```

clear all
close all
clc

home_matlab = pwd;
cd ..
temp = pwd;
source = [temp '\maty\'];
folder_rysunki = [ temp '\obrazy\'];
nazwa_ukladu = {'AL', 'AlMg5', 'AlSi5', 'FeCu', 'MIG308LSi'};

font_ = 12;
scrsz = get(0, 'ScreenSize');

for NrUkladu = 1:5

    clear lista_plikow
    cd(source);
    cd(nazwa_ukladu{NrUkladu});
    lista_plikow = dir;

    lambda_val(1:1:10, :)={[]};
    lambda_ind(1:1:10, :)={[]};

    index_odleglosci = 0;
    for NrPliku = length(lista_plikow); % nr pliki z dla kolejnej
odleglosci
        index_odleglosci = index_odleglosci+1;

nazwa_odleglosci(index_odleglosci)=str2num(lista_plikow(NrPliku).name(1:2))
;

        cd(source);
        cd(nazwa_ukladu{NrUkladu});
        load(lista_plikow(NrPliku).name);
        cd(folder_rysunki);
        cd(nazwa_ukladu{NrUkladu});
        cd(lista_plikow(NrPliku).name(1:4));
    end
end

```

```

[L,tt]=size(dane);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% sortowanie danych zgodnie z wartoscia napiecia
for i=1:10
    macierz_temp = [];
    macierz(i,:) = {macierz_temp};

end
tabala_indexow(1:10) = 0;
for j=1:L % kolejny pomiar, jest ich ok 30 dla kolejnych napiec
    nazwa_temp = cell2mat(nazwaPliku(1,j));
    temp2 = str2num(nazwa_temp(21:22));

    if ~isempty(temp2)
        tabala_indexow(temp2) = tabala_indexow(temp2)+1;
        macierz{temp2,tabala_indexow(temp2),:} = dane(j,:);

        elseif strcmp(nazwa_temp(21:22),'sl'); % ten co go slychać, bez
podania napiecia
        tabala_indexow(10) = tabala_indexow(10)+1;
        macierz{10,tabala_indexow(10),:} = dane(j,:);
    end
end

% rysowanie dla każdego napiecia osobno ( wiersze odpowiadaja
% wartosci napiecia, nr 10 - slychac ulot )
[ii, jj]=size(macierz);

color_ = jet(10);
for index_napiecia=1:ii % dla kolejnych napiec
    macierz_temp = [];
    for j=1:jj % dla kolejnych sampli
        temp = macierz{index_napiecia,j};
        if ~isempty(temp)
            macierz_temp(j,:) = temp;

        end
    end
    if ~isempty(macierz_temp)

        % wyliczanie podstawowej statystyki
        srednia = mean(macierz_temp);

        % określenie specyficznych długości fal
        [rows,cols,vals] = find(srednia > 1600);
        lambda_ind{index_odleglosci,index_napiecia,:} =
czestotliwosci( cols );
        lambda_val{index_odleglosci,index_napiecia,:} =
srednia( cols );

        if lt(index_napiecia,10)

stem3(linspace(index_napiecia,index_napiecia,length(rows)),...
        lambda_ind{index_odleglosci,index_napiecia,:},
lambda_val{index_odleglosci,index_napiecia,:},...

'd','color',color_(index_napiecia,:),'markerfacecolor',color_(index_napieci
a,:))

```

```

        end
        hold on
    end
end % napiecia

grid on;grid minor;
set(gca,'xtick',[1:1:9]);xlim([0.5 9.5]);
set(gca,'xticklabel',[10:10:90])
xlabel('Wartość napięcia, %\itU\rm_{p}','FontSize',font_);
zlabel('Intensywność > 1600 (-)','fontSize',font_);%zlim([1500
+inf]);
ylabel('Długość fali (nm)','FontSize',font_)
set(gcf,'PaperPosition',[1 1 20 15]);%dopasowanie tego co sie
potem wydrukuje

    if isequal(lista_plikow(NrPliku).name(1:2),'35')
        napi_lab = '36';
    else napi_lab = lista_plikow(NrPliku).name(1:2);end

    legend([nazwa_ukladu{NrUkladu} ', '
num2str(str2num((napi_lab))) 'cm'],2);

    nazwaPomiaru = [nazwa_ukladu{NrUkladu} '_']
lista_plikow(NrPliku).name(1:4) '_lambda' ;
print(gcf,'-djpeg','-r1200',nazwaPomiaru);

    clf

end % odleglosci

clear sum* nazwa_odleglosci;

end

```

Wszystkie listingi procedur obliczeniowych znajdują się w załączniku nr 2 do niniejszej pracy na dołączonej płycie.

7.2. Program badawczy prowadzonych w rozprawie pomiarów

Prowadzone badania obejmowały jednoczesną rejestrację widm optycznych generowanych podczas występowania zjawiska wnz na przewodach modelu linii elektroenergetycznej. Zbudowane stanowisko pomiarowe pozwoliło na odtworzenie linii elektroenergetycznej w jej uproszczonej postaci; skupiono się na odwzorowaniu trójkątnego układu przewodów a nie np. na modelowaniu pojemności linii. Taki uproszczony model w całej

dysertacji określany jest jako model linii elektroenergetycznej. Do badań użyto przewodów wykonanych z pięciu różnych materiałów, a mianowicie:

- AL - linia wykonana z przewodów o średnicy $\varphi=1,2$ mm o zawartości aluminium 99,5%,
- AlMg5 - linia wykonana z przewodów o średnicy $\varphi=1,2$ mm o zawartości aluminium 94,4792% i zawartości magnezu 4,89%,
- ALSi5 - linia wykonana z przewodów o średnicy $\varphi=1,2$ mm o zawartości aluminium 94,6751% i zawartości krzemu 5,11%,
- FeCu - linia wykonana z przewodów o średnicy $\varphi=1,2$ mm wykonanych ze stali powierzchniowo miedziowanej,
- MIG308LSi - linia wykonana z przewodów o średnicy $\varphi=1,2$ mm o zawartości głównych składników: chrom 19,6%, nikiel 9,08%, mangan 1,85%, żelazo 68% (stal nierdzewna).

Dla każdego z materiałów zbudowano model linii trójfazowej o trójkątnym układzie przewodów, następnie zmieniając odległości między przewodami d od 8cm do 36 cm co 2 cm wyznaczano międzyfazowe napięcie przebicia układu U_p oraz napięcie początkowe ulotu U_0 . Dla każdego układu określano wartości przykładowych napięć międzyfazowych jako pochodna napięcia przebicia według zasady: 10% U_p , 20% U_p , 30% U_p , itd. aż do 90% U_p . Dla każdej z wartości przyłożonego napięcia międzyfazowego zaczynając od wartości U_0 i dla każdej z odległości dokonywano rejestracji emitowanych widm za pomocą spektrofotometru oraz intensywności występowania wnz za pomocą kamery UV. Zarejestrowane wyniki pomiarów poddano analizie w środowisku programistycznym MATLAB.

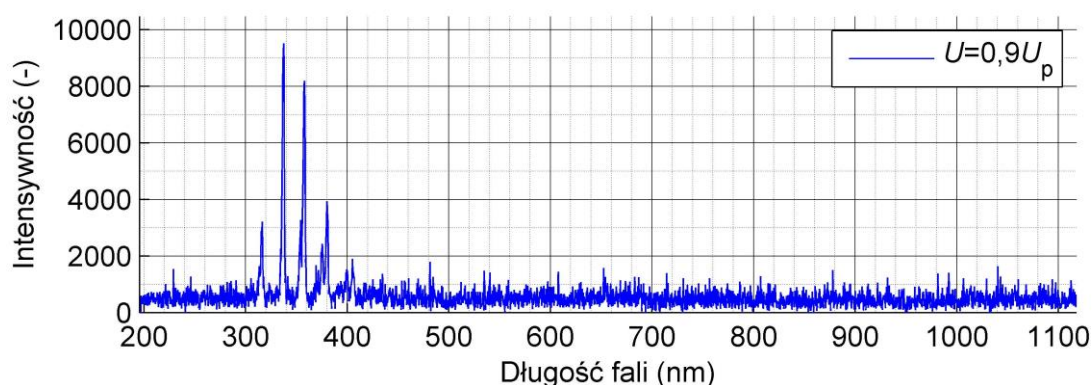
7.3. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium, typ AL

W podrozdziale 7.3 prezentowane są wybrane, przykładowe wyniki uzyskane w trakcie badań linii wykonanej z aluminium. Wyniki badań dla pozostałych modeli linii wykonanych z AlMg5, ALSi5, FeCu, MIG308LSi zamieszczono w załączniku nr 1. Załącznik ten obejmuje wyniki 48 widm wnz zarejestrowanych w układach wykonanych z opisanych wcześniej materiałów i przedstawia odpowiednio:

- wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, typ AlMg5
- wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu, typ AlSi5
- wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, typ FeCu
- wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, typ MIG308LSi

Wyniki pomiarów przedstawione zostały w postaci wykresów prezentujących zależności między odległościami międzyprzewodowymi i wartościami napięć przyłożonych do linii trójfazowej a emitowanymi przez wnz widmami oraz intensywnością wnz dla poszczególnych materiałów, z których wykonano przewody linii elektroenergetycznej.

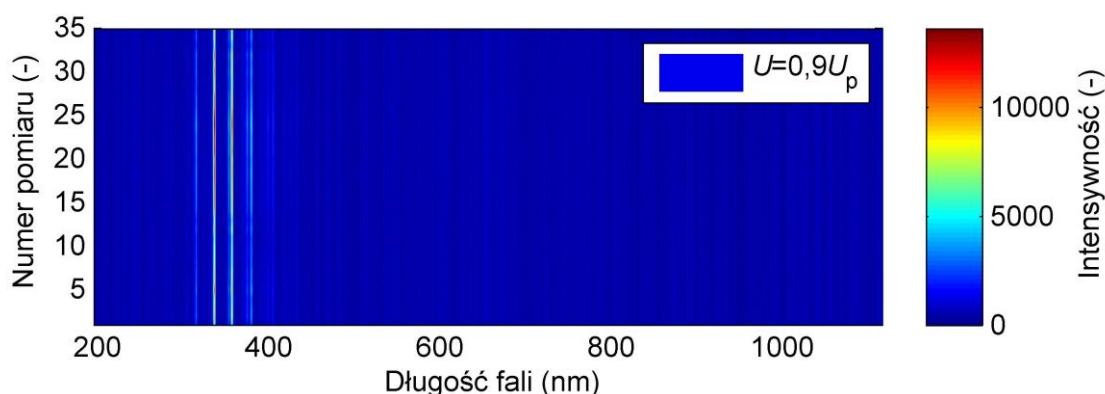
Na rys. 7.1 przedstawiono przykładowe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium, podczas pomiarów przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



Rys. 7.1 Intensywność i struktura widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanej z aluminium przy napięciu $0,9U_p = 109,1$ kV i odległości $d = 36$ cm.

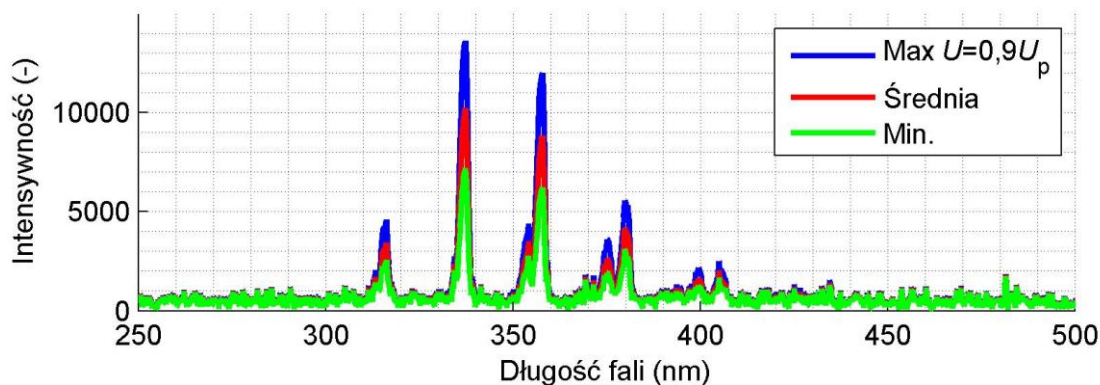
Na rys. 7.2 przedstawiono zestawienie zbiorcze wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$, dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów, czyli dla 35 pomiarów.

Widać na rysunku, że dla całego zarejestrowanego widma, dla wszystkich wykonanych pomiarów, występują praktycznie 4 wyraźne składowe widma.



Rys. 7.2 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół aluminiowej linii przy napięciu $0,9U_p = 109,1$ kV i odległości $d=36$ cm.

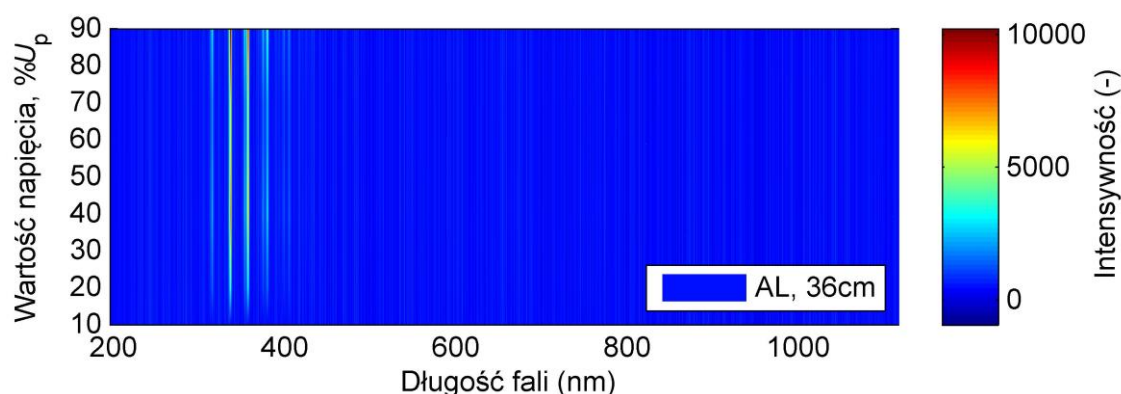
Na rys. 7.3 przedstawiono podstawowe statystyki uzyskane z 30 pomiarów: wartość średniej arytmetycznej, maksymalną i minimalną, obliczone dla intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



Rys. 7.3 Wartość maksymalna (Max), średnia i minimalna (Min.) intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół aluminiowej linii przy napięciu $0,9U_p = 109,1$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 7.4 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych ze wszystkich pomiarów wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wszystkich analizowanych wartości napięcia generacji ulotu. Na rysunku widać, że dla całego zarejestrowanego widma, dla wszystkich wykonanych pomiarów, występują praktycznie 4 wyraźne składowe widma. Składowe te mają tę samą długość fali niezależną

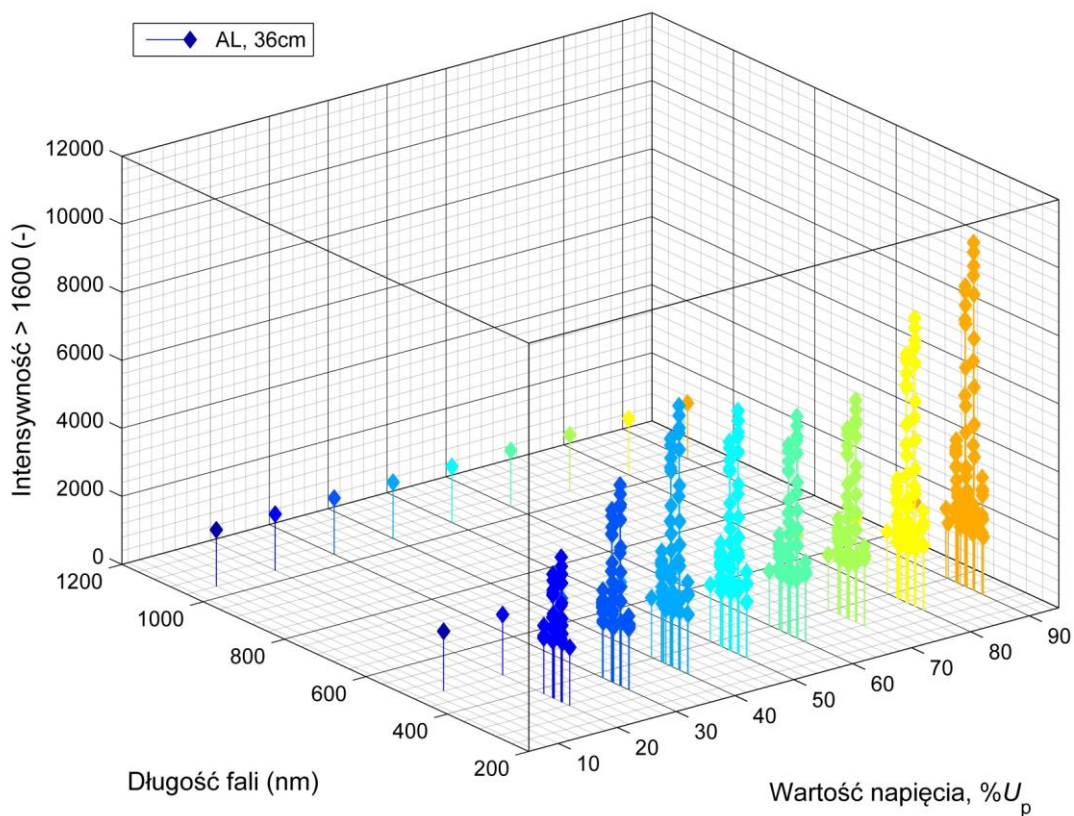
od przyłożonego napięcia, natomiast wraz ze wzrostem napięcia rośnie intensywność występowania poszczególnych składowych zarejestrowanego widma.



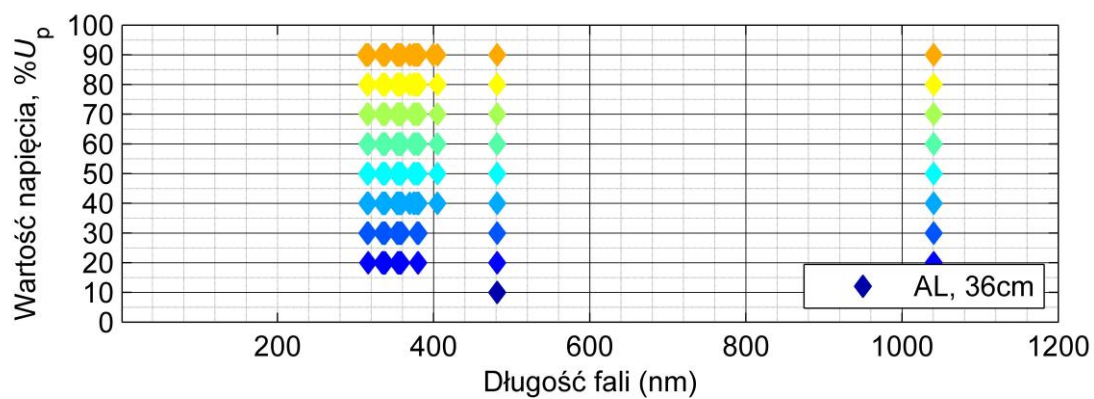
Rys. 7.4 Zależność uśrednionych wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół aluminiowej linii przy odległości $d=36\text{cm}$ od napięcia generacji ulotu.

W celu analizy dominujących składowych widma na rys. 7.5 przedstawiono zbiorcze zestawienie intensywności przekraczających wartość 1600 ($I > 1600$), uzyskanych podczas pomiarów widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium przy odległości między przewodami linii $d = 36\text{ cm}$ w funkcji napięcia generacji ulotu. Wartość intensywności 1600 jest wartością umowną, przyjętą dla konkretnych występujących w rozprawie układów pomiarowych. Dla każdego układu pomiarowego zostało zarejestrowane tło, tj. sygnał rejestrowany przez spektrofotometr podczas gdy do linii nie jest podawane napięcie. W efekcie analizy zarejestrowanych sygnałów tła (ich intensywności) wyznaczono granicę 1600 jednostek jako poziom, powyżej którego pojawia się użyteczny sygnał poddawany dalszej obróbce i analizie. Wartość 1600 jednostek jest wartością bezwymiarową związaną z zastosowanym typem spektrofotometru, zastosowanym oprogramowaniem do rejestracji widm oraz konkretnymi układami pomiarowymi i ma zastosowanie wyłącznie w niniejszej pracy.

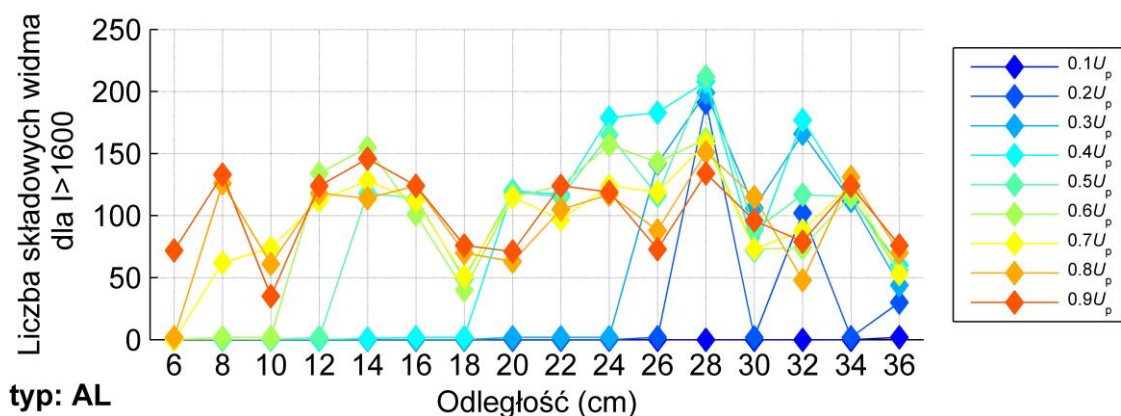
Na rys. 7.6 zaznaczono, które składowe widma o intensywności $I > 1600$ zarejestrowano w trakcie pomiaru ulotu emitowanego wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium dla różnych wartości napięć przy odległości między przewodami linii $d = 36\text{ cm}$. Składowe widma o intensywności $I > 1600$ podliczono i przedstawiono w sposób zbiorczy na rys. 7.7 dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii wykonanej z aluminium.



Rys. 7.5 Zestawienie zbiorcze intensywności widma dla $I > 1600$, zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości $d=36\text{cm}$ (w celu podniesienia czytelności rysunku zastosowano różne kolory).

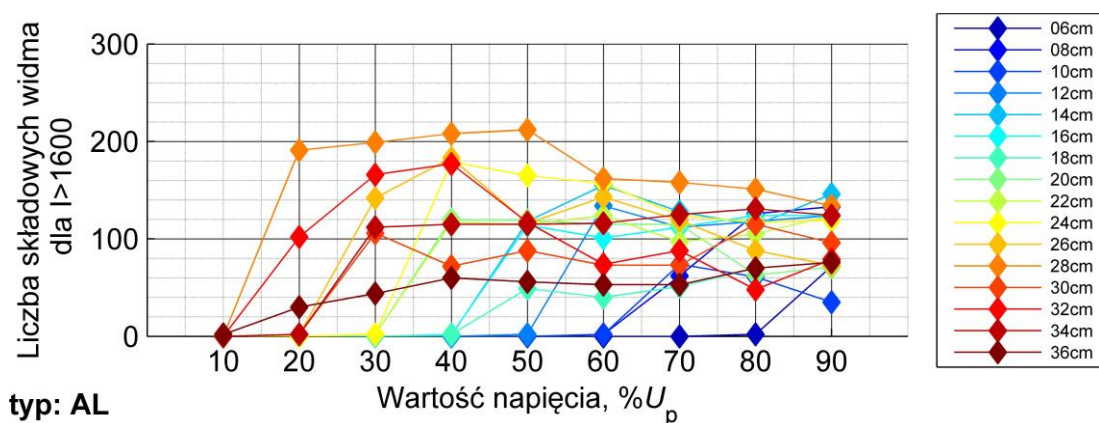


Rys. 7.6 Składowe widma o intensywności $I > 1600$ występujące w sygnałach zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości między przewodami linii aluminiowej $d=36\text{cm}$.



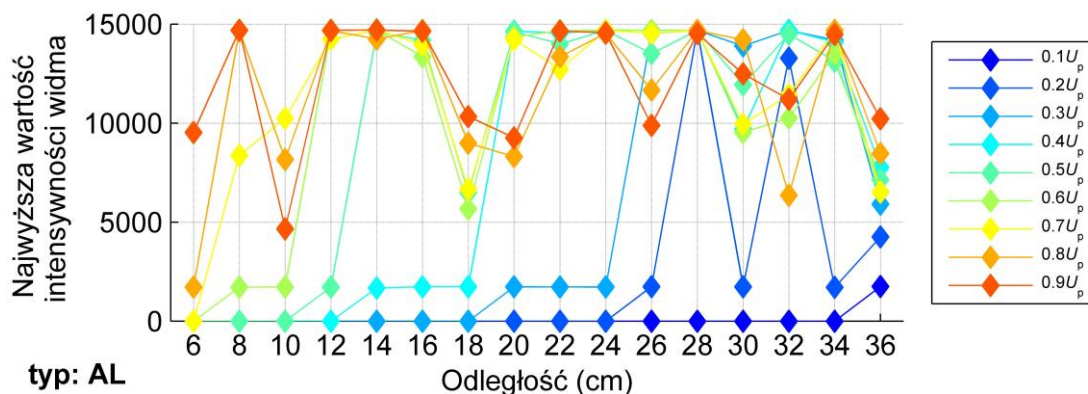
Rys. 7.7 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych wartości napięcia generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii aluminiowej.

Na rys. 7.8 przedstawiono składowe widma o intensywności $I > 1600$ dla różnych odległości między przewodami linii aluminiowej, w funkcji napięcia generacji ulotu.



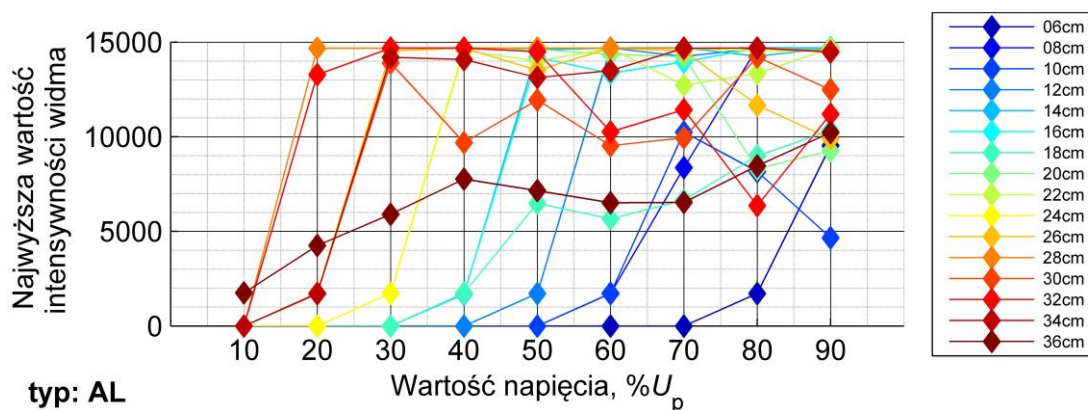
Rys. 7.8 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych odległości między przewodami linii aluminiowej w funkcji napięcia generacji ulotu.

Na rys. 7.9 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii wykonanymi z aluminium.



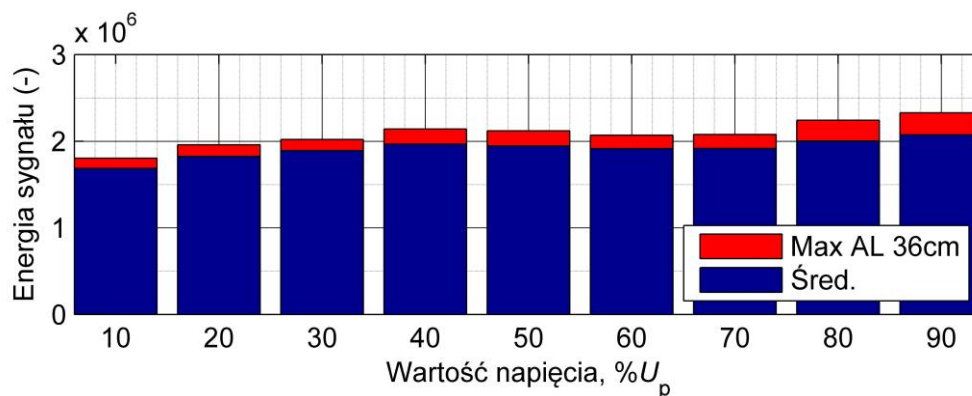
Rys. 7.9 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych wartości napięcia generacji w funkcji odległości między przewodami linii aluminiowej.

Na rys. 7.10 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla różnych odległości między przewodami linii aluminiowej w funkcji napięcia generacji ulotu.



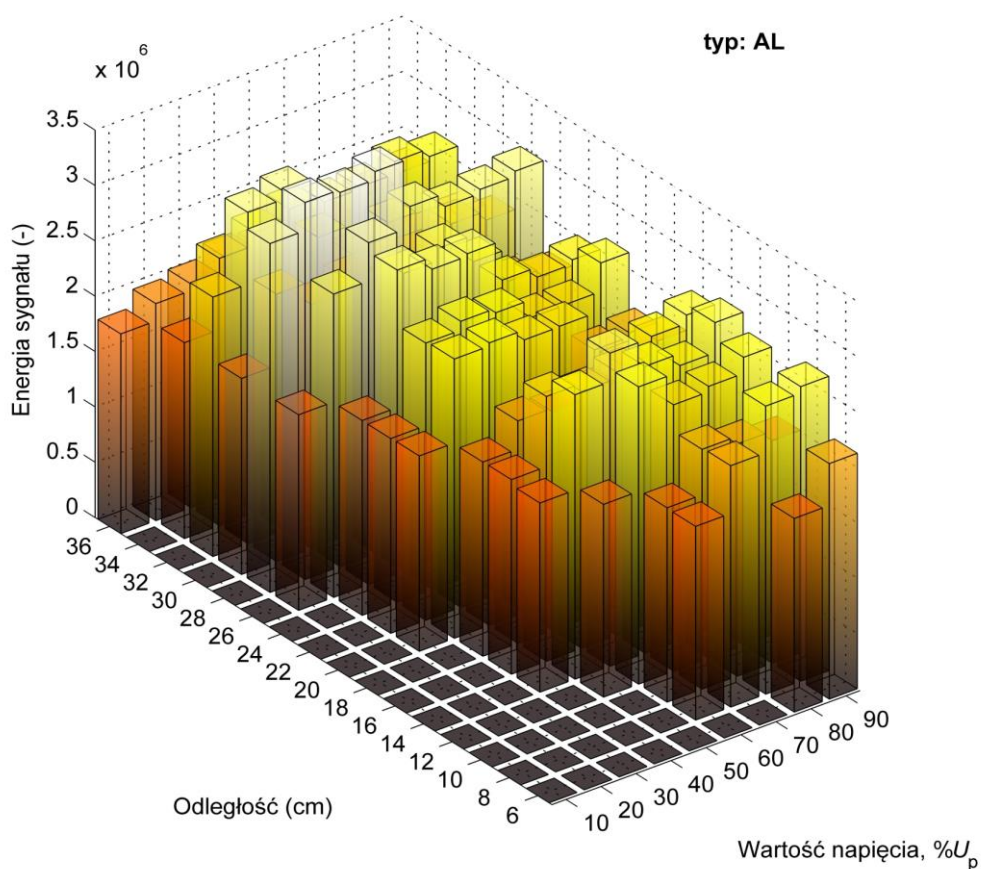
Rys. 7.10 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych odległości między przewodami linii aluminiowej w funkcji wartości napięcia generacji.

Na rys. 7.11 przedstawiono energię sygnału obliczoną dla wartości maksymalnych i średnich intensywności widma podczas pomiarów przy różnych napięciach generacji ulotu przy odległości między przewodami linii aluminiowej $d=36\text{cm}$. Energia sygnału została tutaj policzona jako pole pod krzywą, czyli suma wszystkich wartości składowych widma wyłącznie w celach porównawczych, stąd jest wartością bezwymiarową (umowna ilość jednostek energii).



Rys. 7.11 Zależność energii sygnału obliczonej dla maksymalnej (Max) i średniej intensywności widma emitowanego przez ulot przy odległości między przewodami linii aluminiowej $d=36$ cm w funkcji napięcia generacji.

Na rys. 7.12 przedstawiono w sposób zbiorczy wartości energii sygnałów obliczone dla uśrednionych intensywności widma emisyjnego emitowanego przy różnych napięciach generacji ulotu i różnych odległościach między przewodami linii aluminiowej.

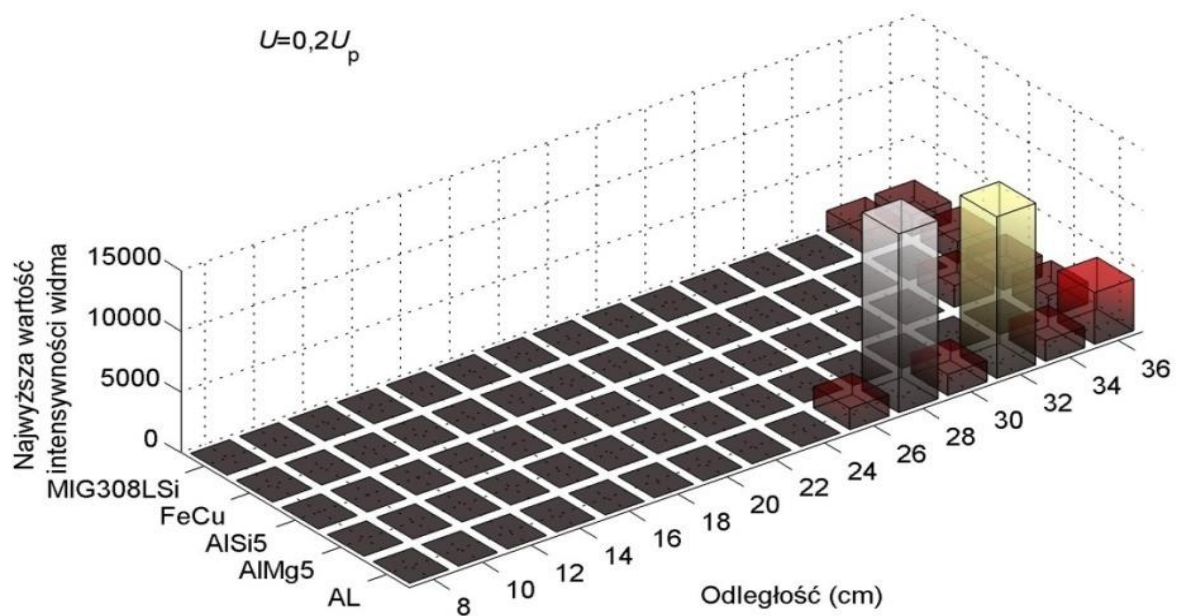


Rys. 7.12 Zależność energii sygnału obliczonej dla uśrednionych intensywności widma emitowanego przez ulot w funkcji odległości d i w funkcji napięcia generacji.

7.4. Zestawienia porównawcze wyników uzyskanych z przeprowadzonych analiz dla badanych typów linii

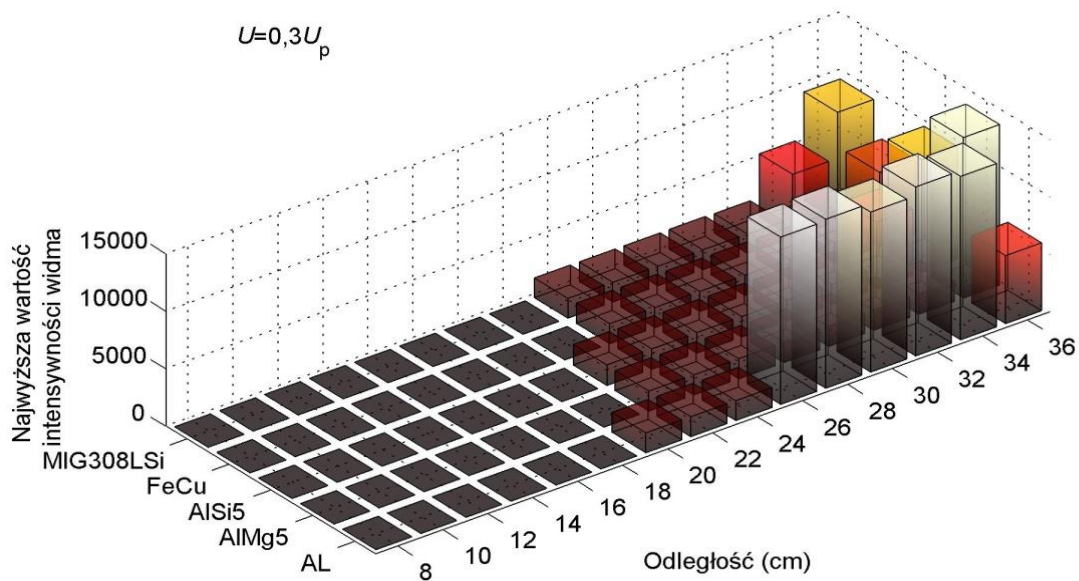
7.4.1. Zależność najwyższej wartości intensywności widma od odległości między przewodami linii wykonanymi z różnych materiałów dla różnych wartości napięcia generacji ulotu

Na rys. 7.13 przedstawiono najwyższe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot w funkcji odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,2U_p$.



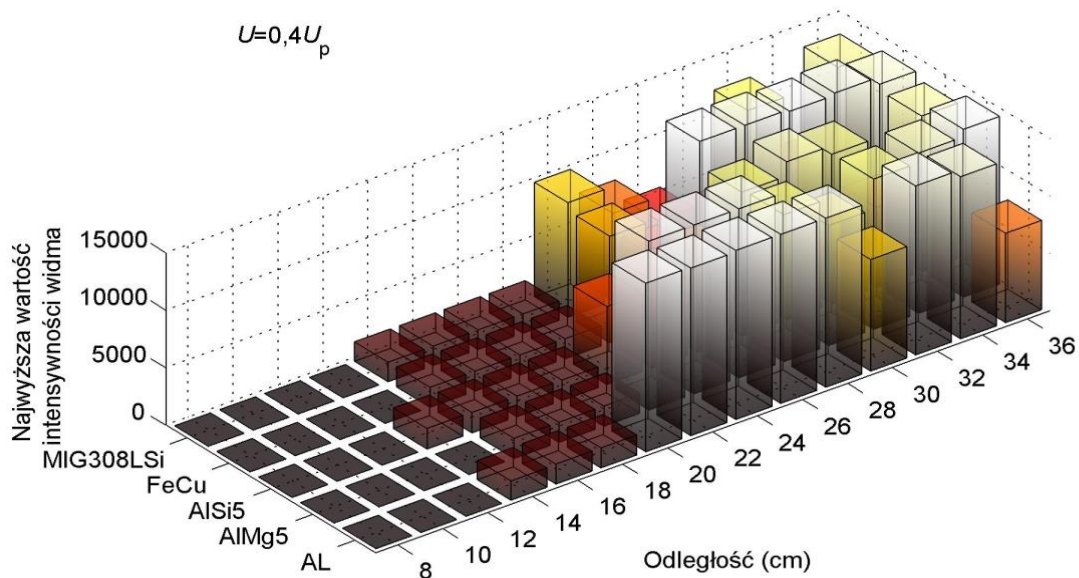
Rys. 7.13 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z różnych materiałów w funkcji odległości przy napięciu $0,2U_p$.

Na rys. 7.14 przedstawiono najwyższe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot w funkcji odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,3U_p$.



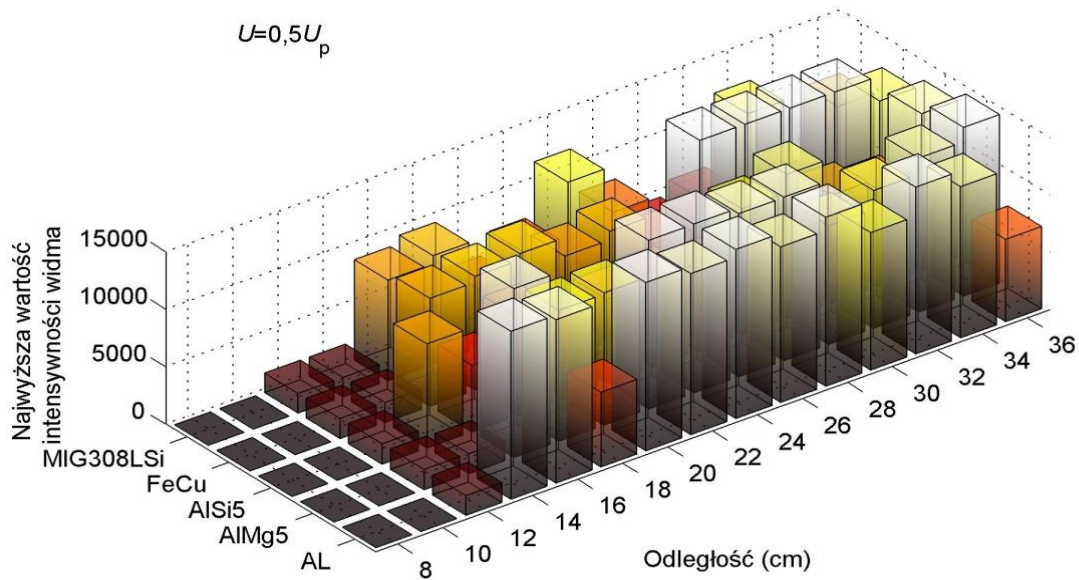
Rys. 7.14 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z różnych materiałów w funkcji odległości przy napięciu $0,3U_p$.

Na rys. 7.15 przedstawiono najwyższe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot w funkcji odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,4U_p$.



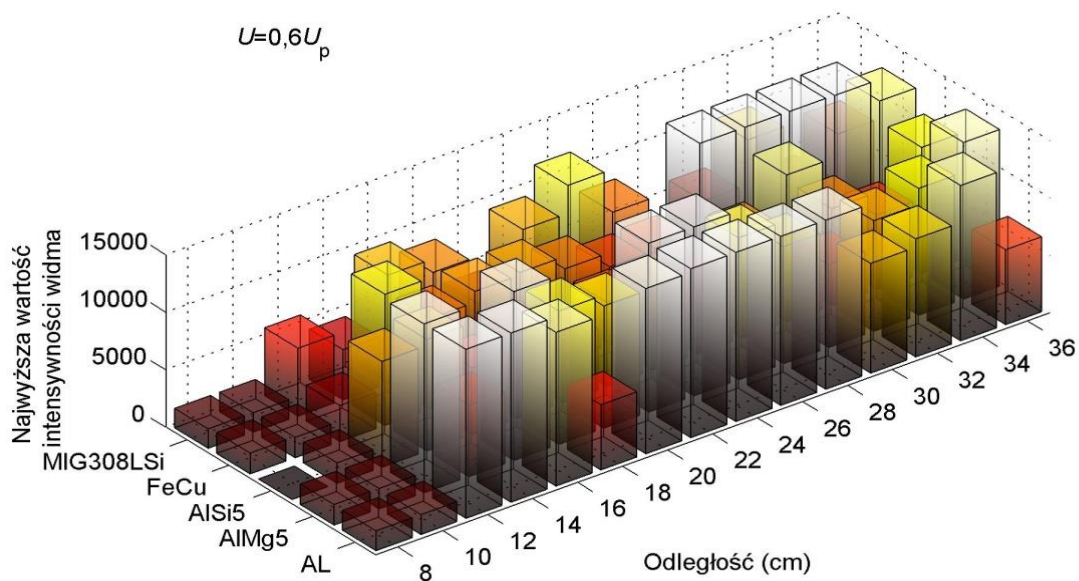
Rys. 7.15 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z różnych materiałów w funkcji odległości przy napięciu $0,4U_p$.

Na rys. 7.16 przedstawiono najwyższe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot w funkcji odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,5U_p$.



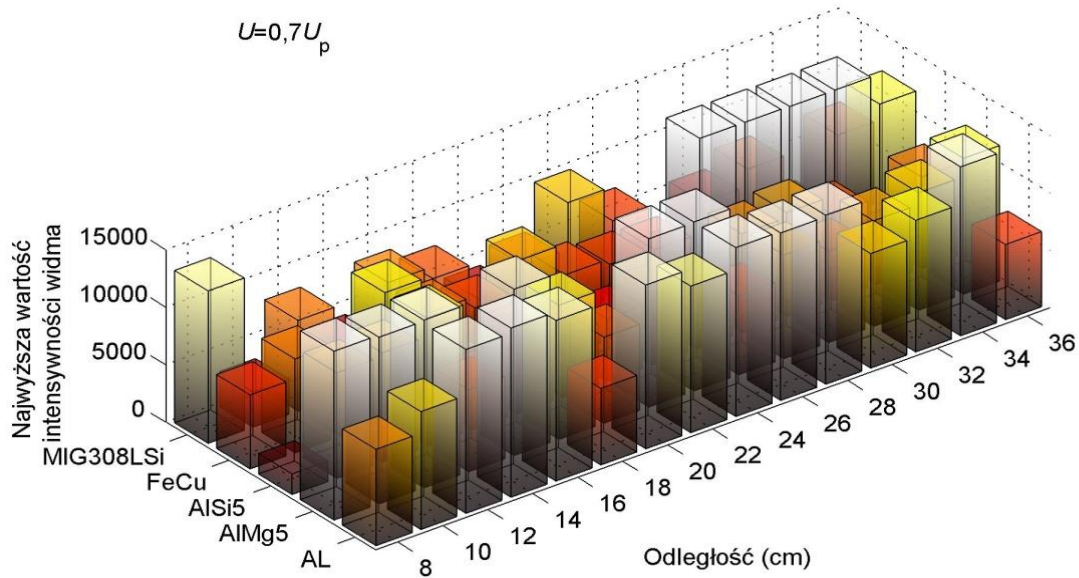
Rys. 7.16 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z różnych materiałów w funkcji odległości przy napięciu $0,5U_p$.

Na rys. 7.17 przedstawiono najwyższe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot w funkcji odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,6U_p$.



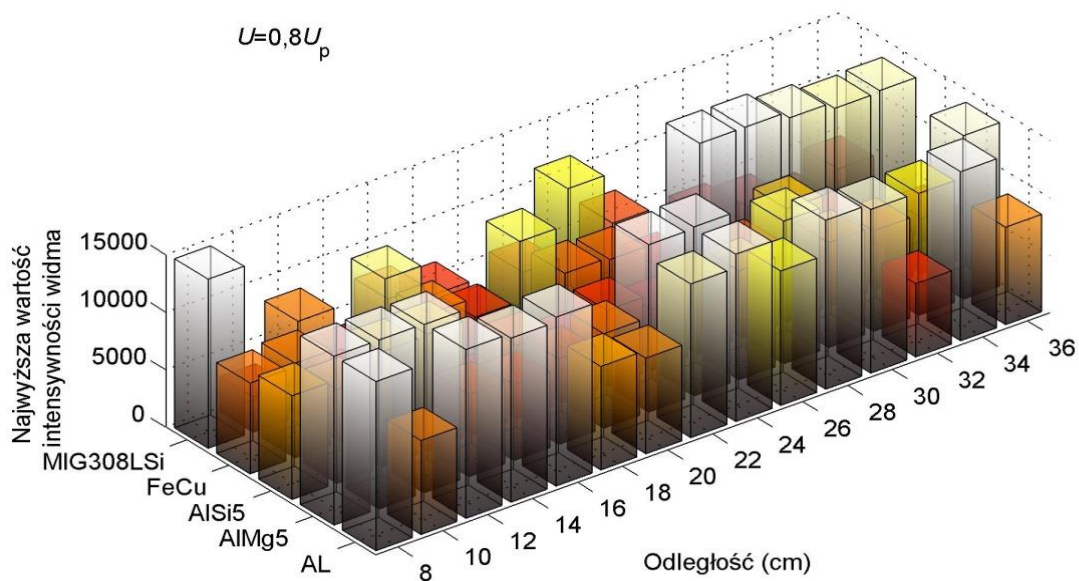
Rys. 7.17 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z różnych materiałów w funkcji odległości przy napięciu $0,6U_p$.

Na rys. 7.18 przedstawiono najwyższe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ułot w funkcji odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów, dla wartości napięcia generacji ułotu odpowiadającej $0,7U_p$.



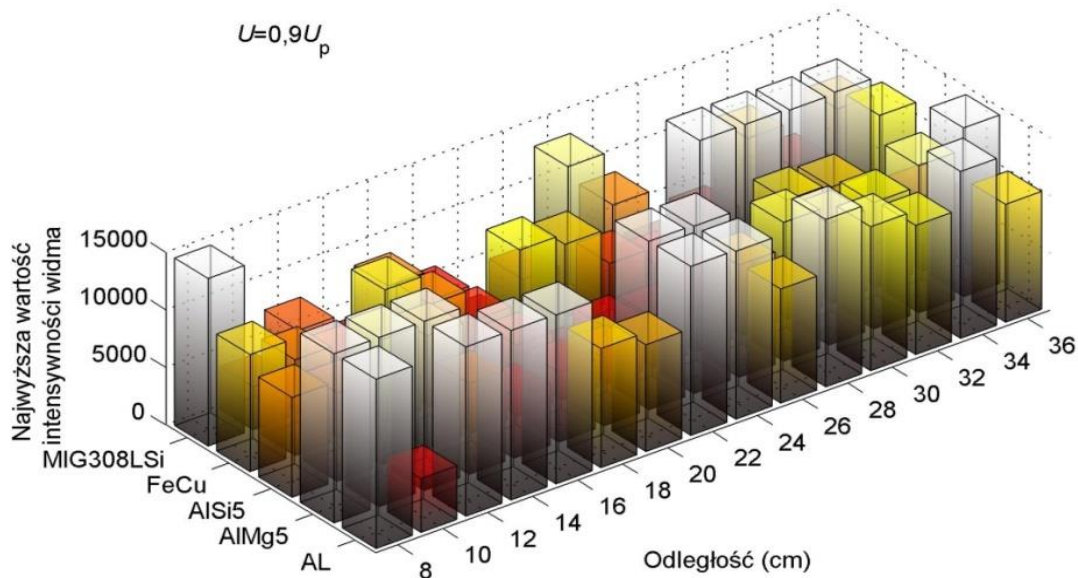
Rys. 7.18 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z różnych materiałów w funkcji odległości przy napięciu $0,7U_p$.

Na rys. 7.19 przedstawiono najwyższe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ułot w funkcji odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów, dla wartości napięcia generacji ułotu odpowiadającej $0,8U_p$.



Rys. 7.19 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z różnych materiałów w funkcji odległości przy napięciu $0,8U_p$.

Na rys. 7.20 przedstawiono najwyższe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot w funkcji odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



Rys. 7.20 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z różnych materiałów w funkcji odległości przy napięciu $0,9U_p$.

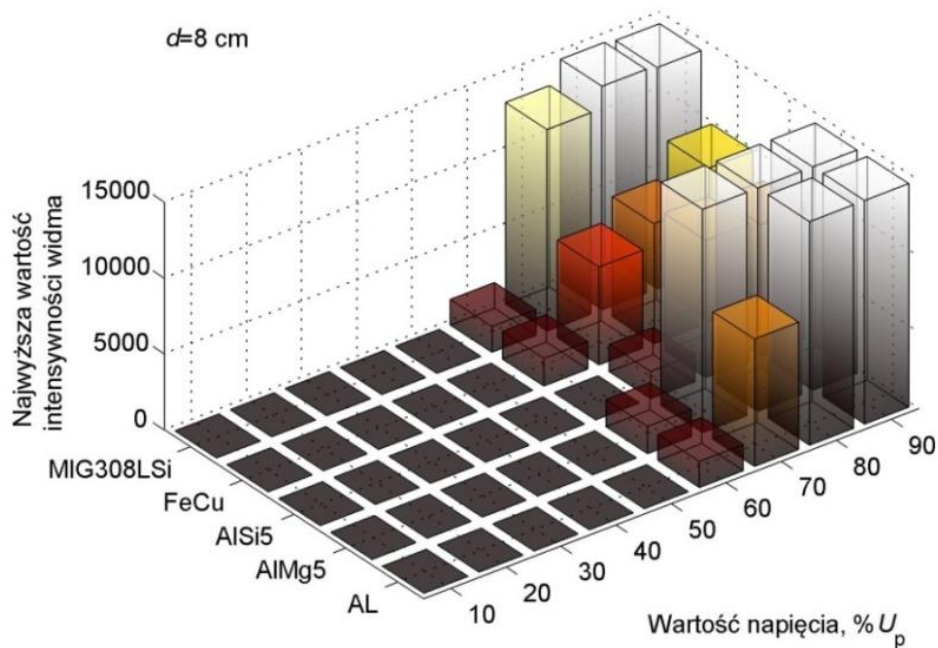
7.4.2. Zależność najwyższej wartości intensywności widma od wartości napięcia generacji ulotu dla kolejnych odległości między przewodami linii wykonanymi z różnych materiałów

Na rys. 7.21 – 7.35 przedstawiono najwyższe zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanych z pięciu różnych materiałów podczas pomiarów dla różnych wartości napięcia generacji ulotu przy odległościach między przewodami linii zmieniającymi się w zakresie od $d = 8$ cm do 36 cm co 2 cm.

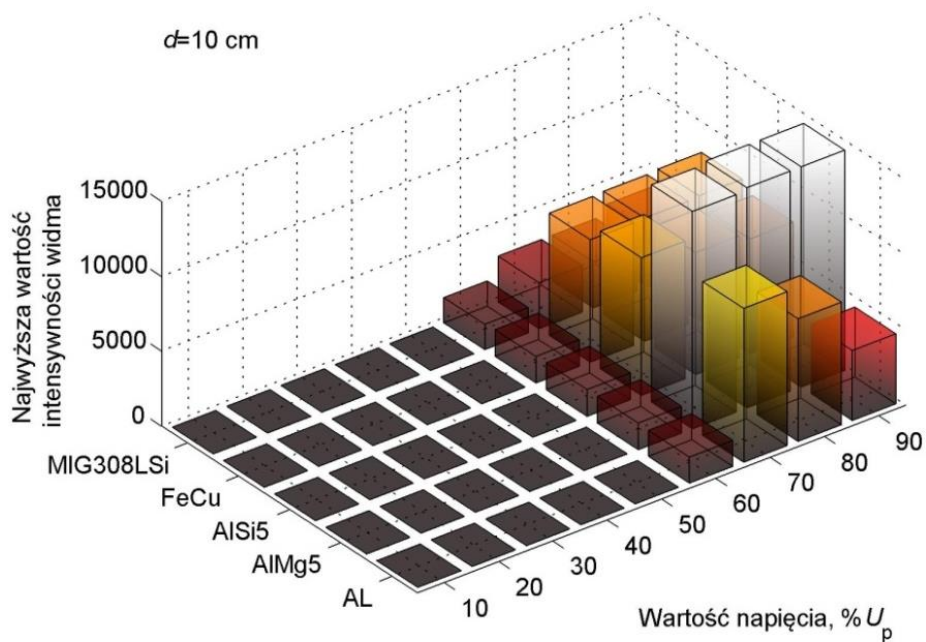
Kolejne rysunki przedstawiają:

- rys. 7.21 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 8$ cm
- rys. 7.22 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 10$ cm

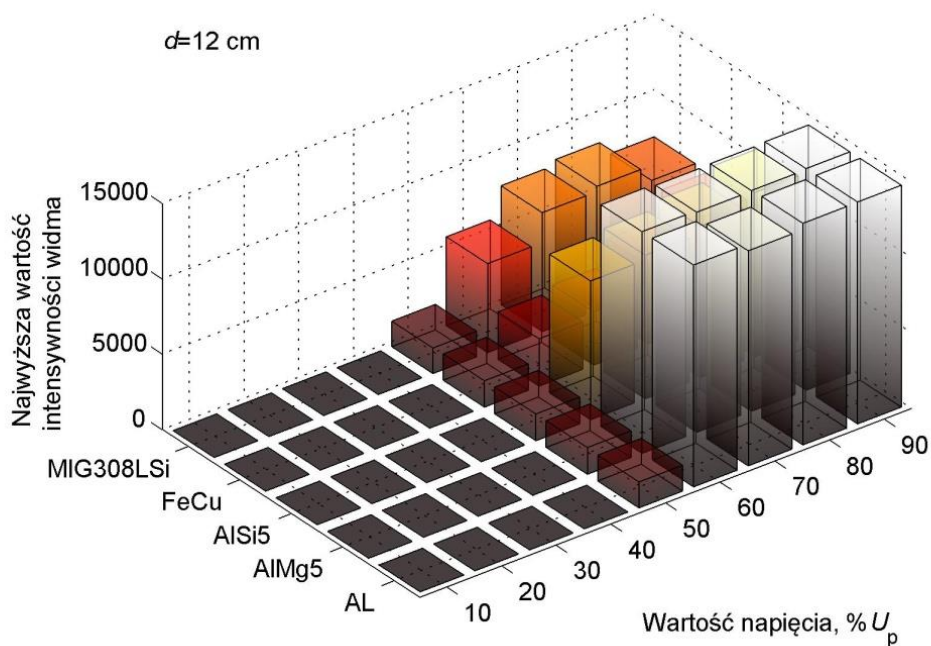
- rys. 7.23 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 12$ cm
- rys. 7.24 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 14$ cm
- rys. 7.25 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 16$ cm
- rys. 7.26 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 18$ cm
- rys. 7.27 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 20$ cm
- rys. 7.28 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 22$ cm
- rys. 7.29 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 24$ cm
- rys. 7.30 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 26$ cm
- rys. 7.31 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 28$ cm
- rys. 7.32 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 30$ cm
- rys. 7.33 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 32$ cm
- rys. 7.34 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 34$ cm
- rys. 7.35 - intensywność widma emisyjnego dla odległości $d = 36$ cm



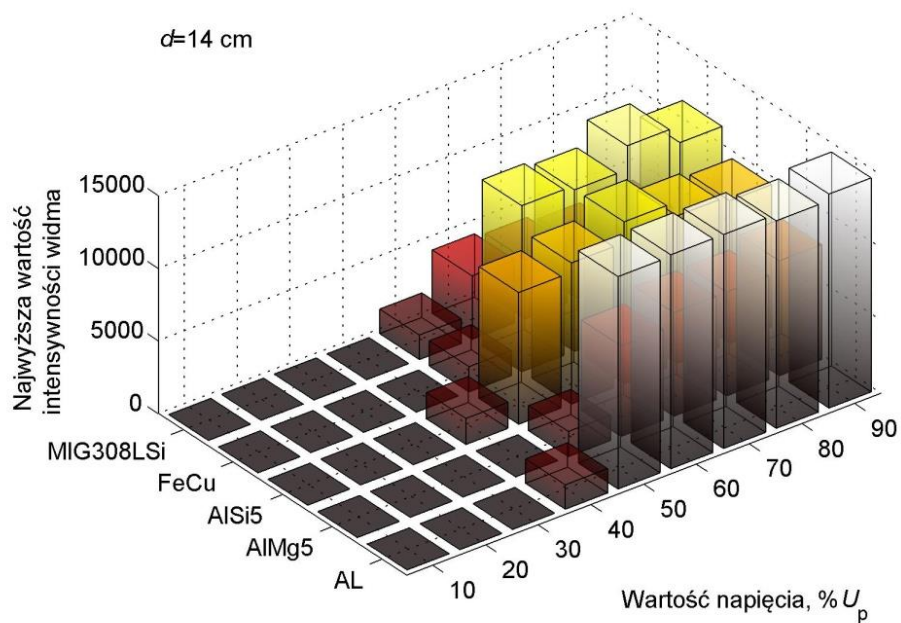
Rys. 7.21 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=8$ cm.



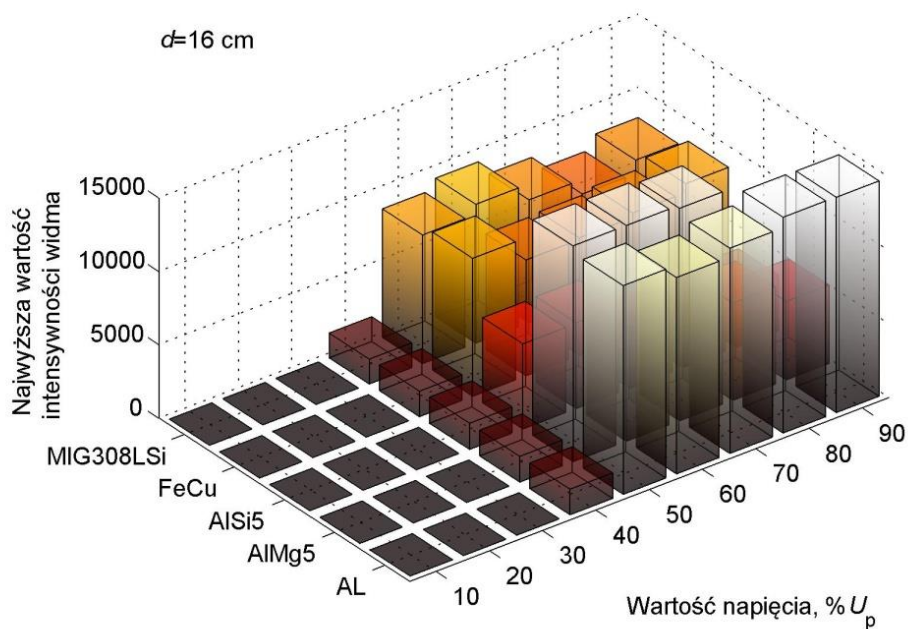
Rys. 7.22 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=10$ cm.



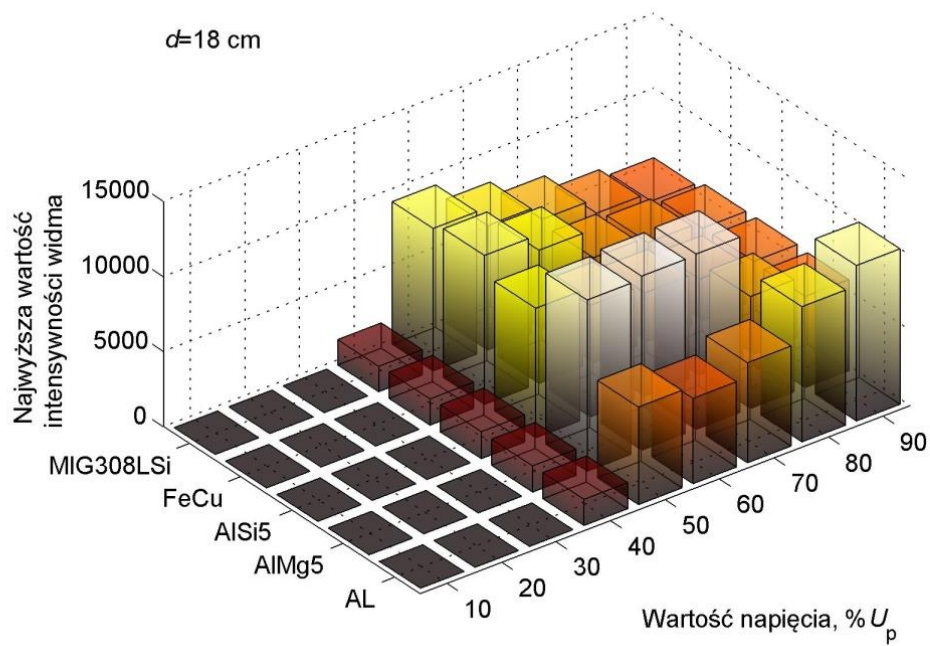
Rys. 7.23 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=12$ cm.



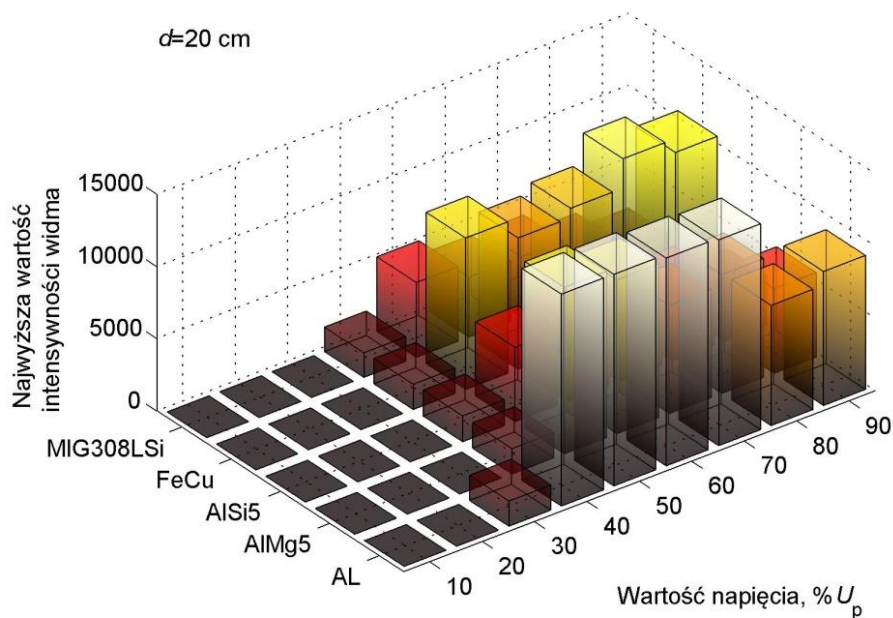
Rys. 7.24 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=14$ cm.



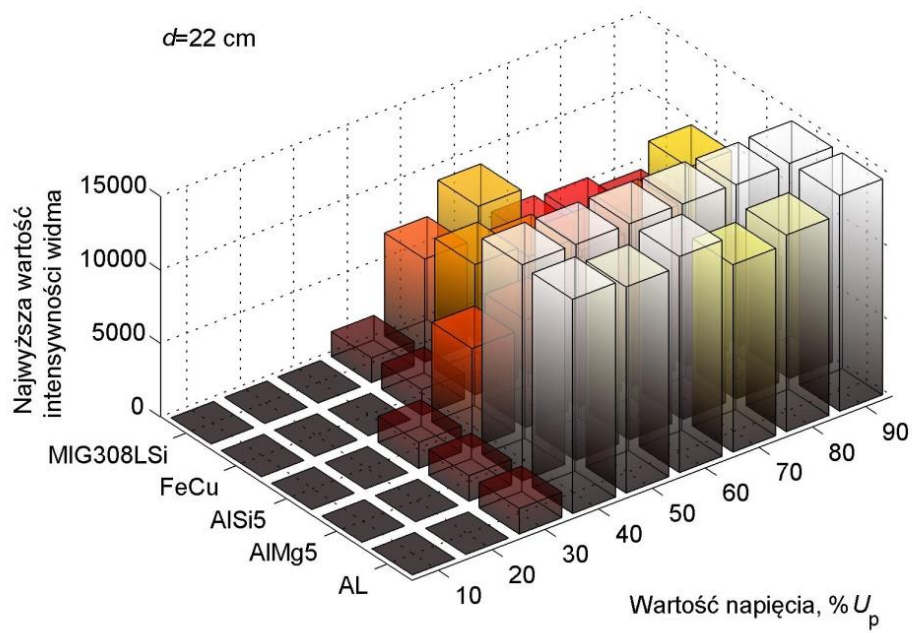
Rys. 7.25 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=16$ cm.



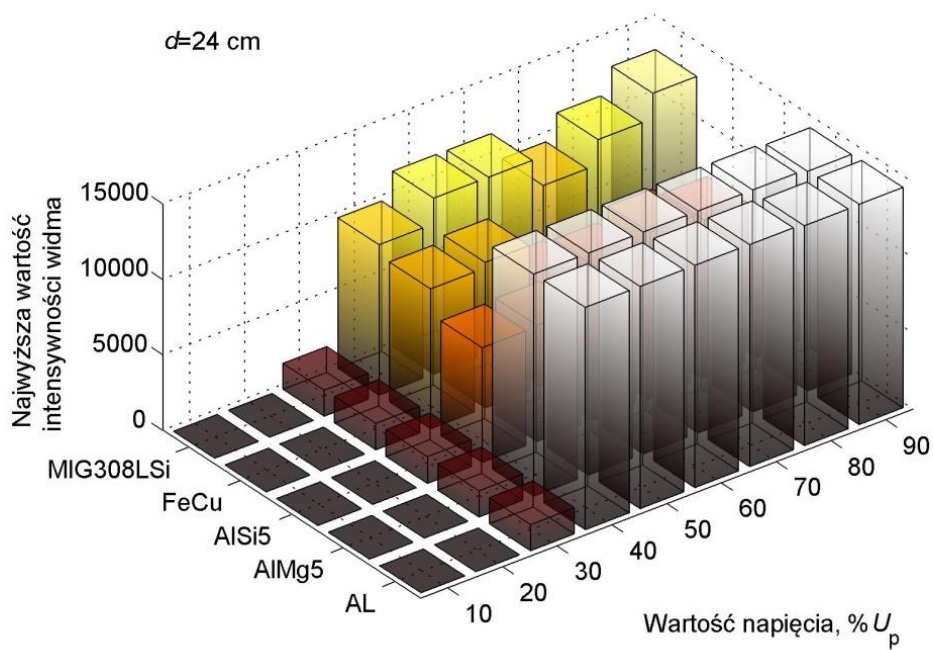
Rys. 7.26 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=18$ cm.



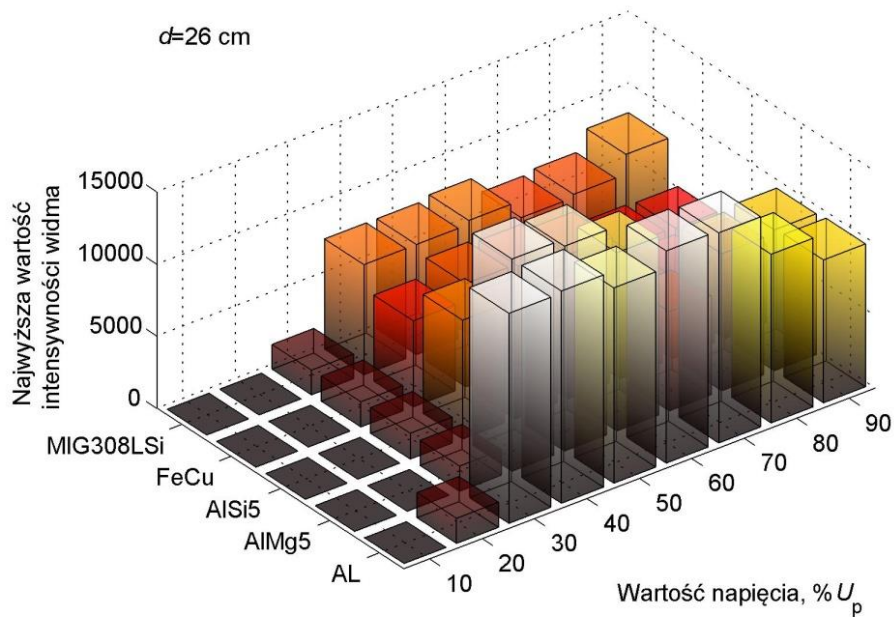
Rys. 7.27 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=20$ cm.



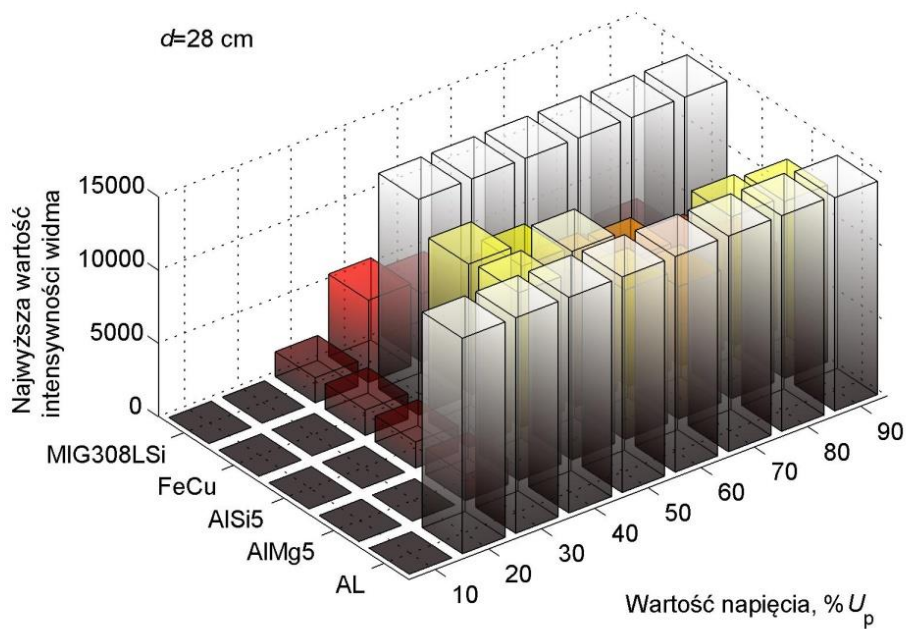
Rys. 7.28 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=22$ cm.



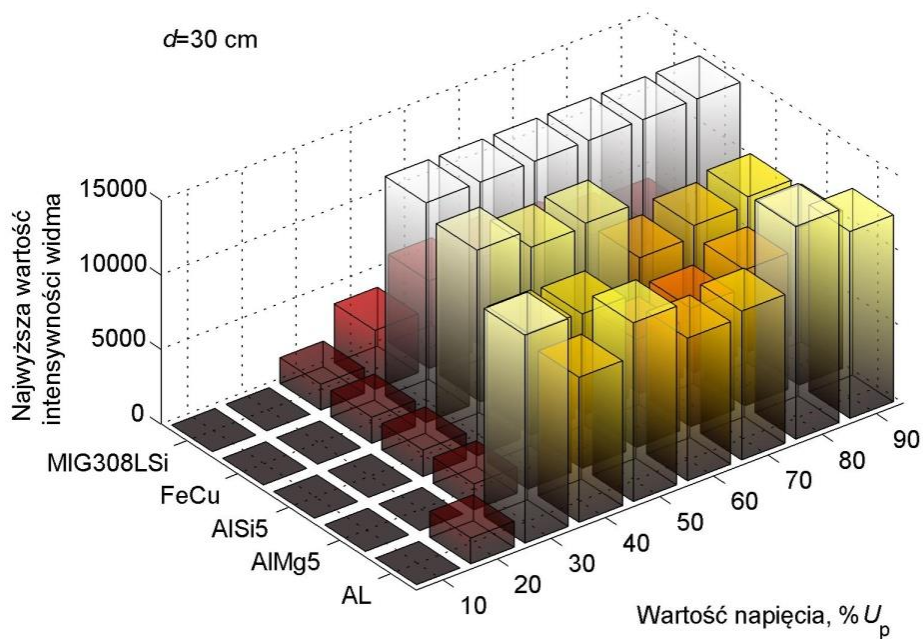
Rys. 7.29 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=24$ cm.



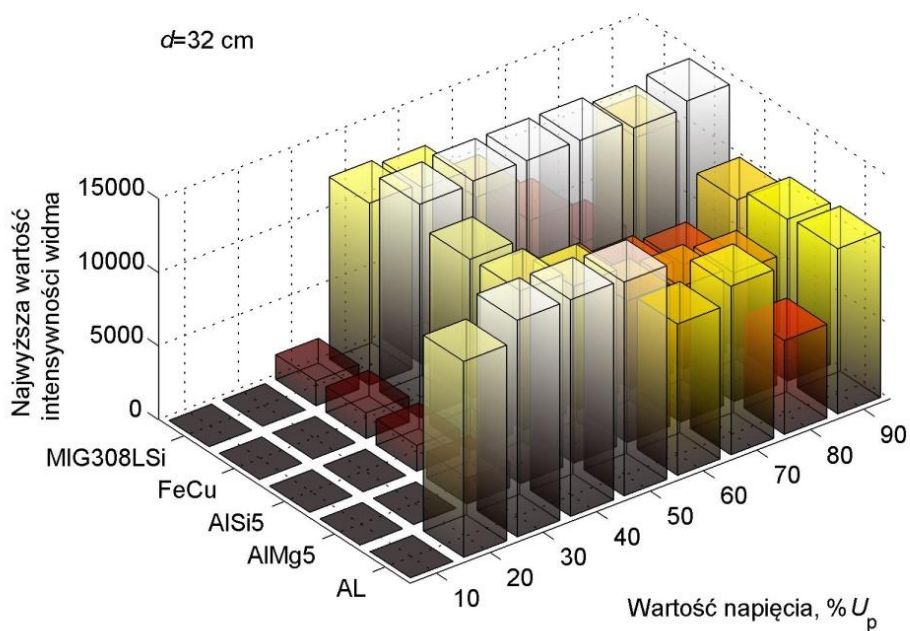
Rys. 7.30 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=26\text{ cm}$.



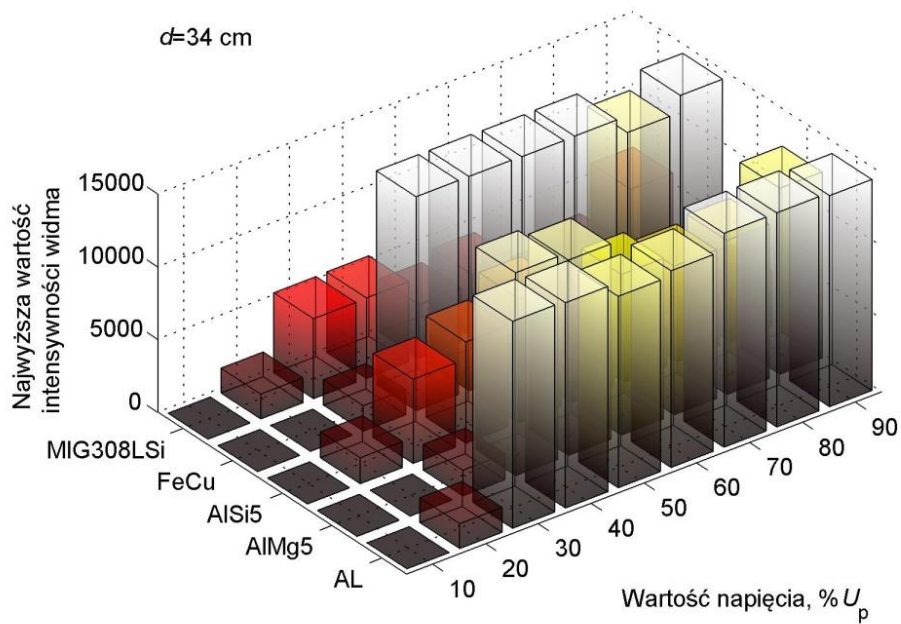
Rys. 7.31 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=28\text{ cm}$.



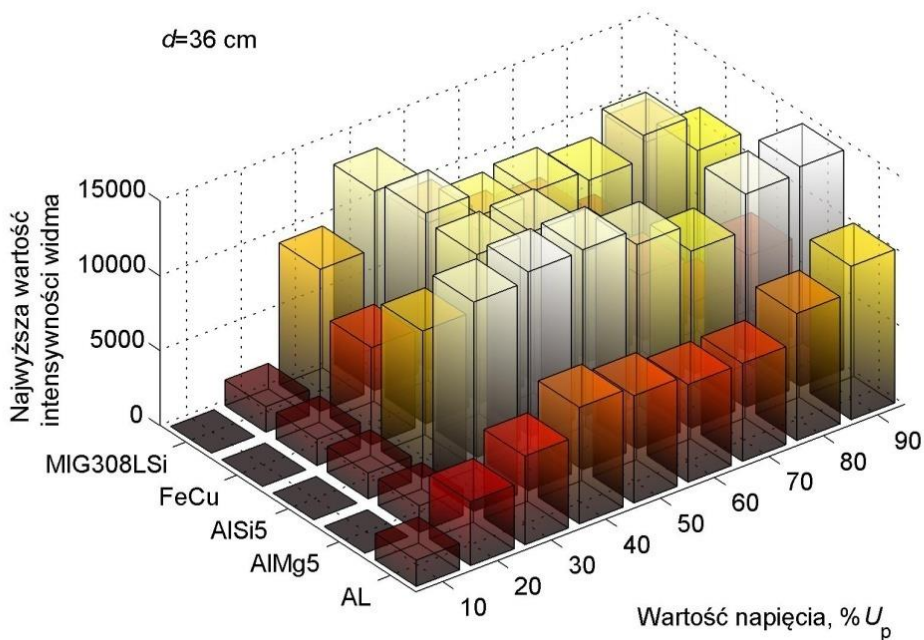
Rys. 7.32 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=30$ cm.



Rys. 7.33 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=32$ cm.



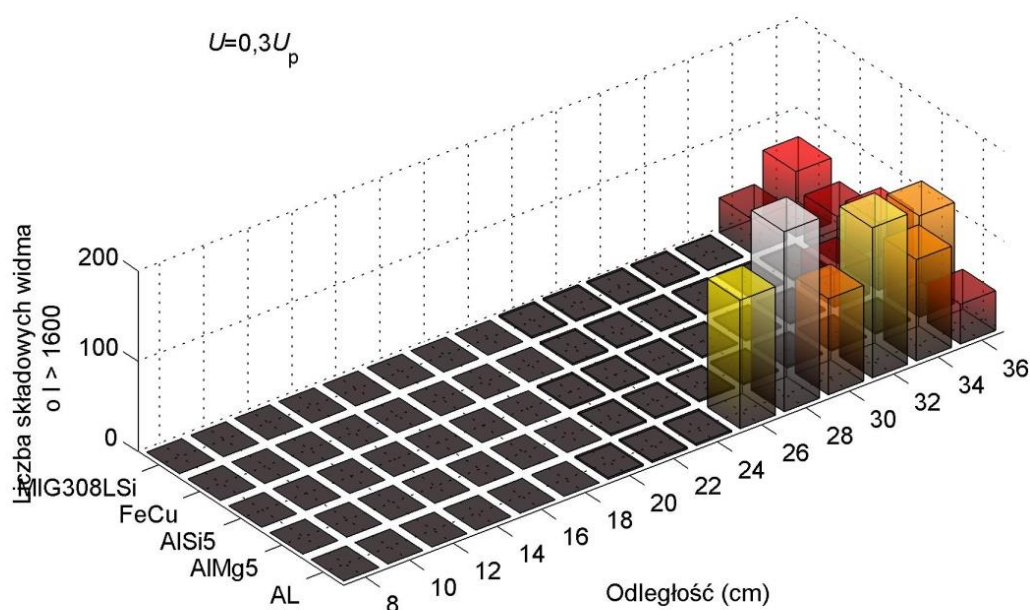
Rys. 7.34 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=34$ cm.



Rys. 7.35 Najwyższe wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych napięć generacji przy odległości między przewodami linii $d=36$ cm.

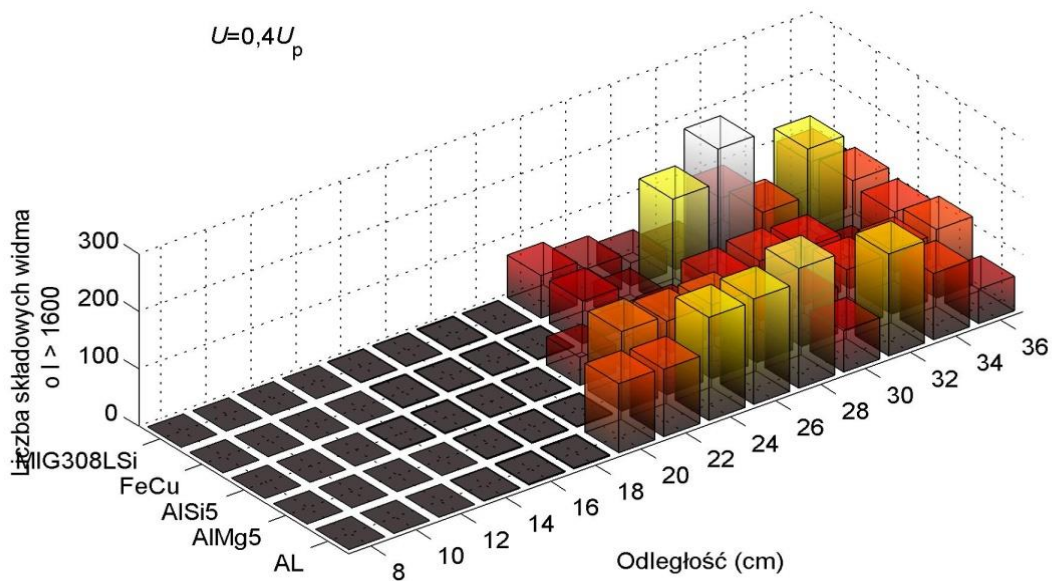
7.4.3. Zależność liczby składowych widma od odległości między przewodami linii wykonanych z różnych materiałów dla różnych wartości napięcia generacji ulotu

Na rys. 7.36 przedstawiono liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, podczas pomiarów przy różnych odległościach między przewodami linii dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,3U_p$.



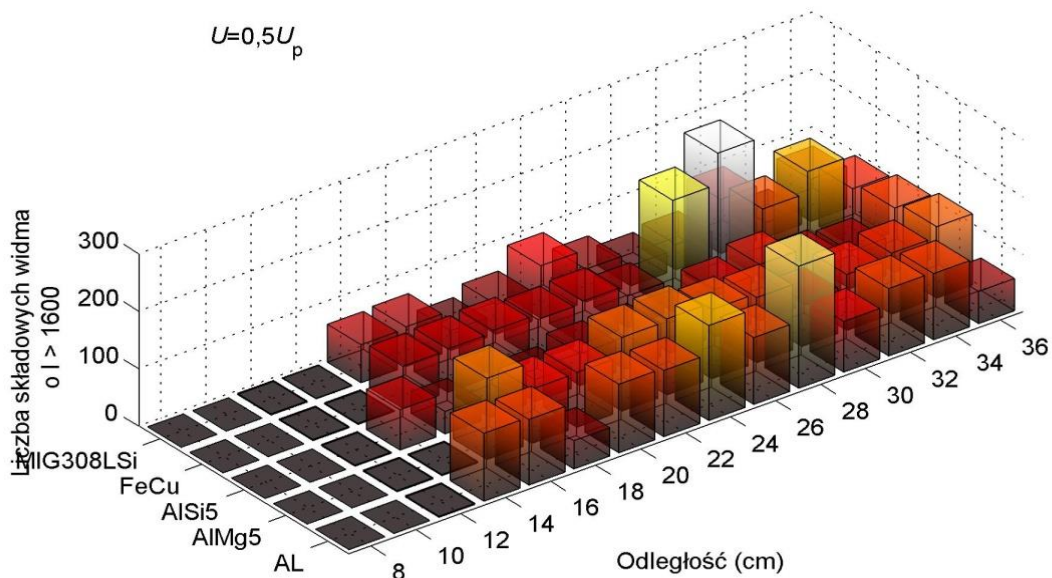
Rys. 7.36 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych odległości przy napięciu $0,3U_p$.

Na rys. 7.37 przedstawiono liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, podczas pomiarów przy różnych odległościach między przewodami linii dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,4U_p$.



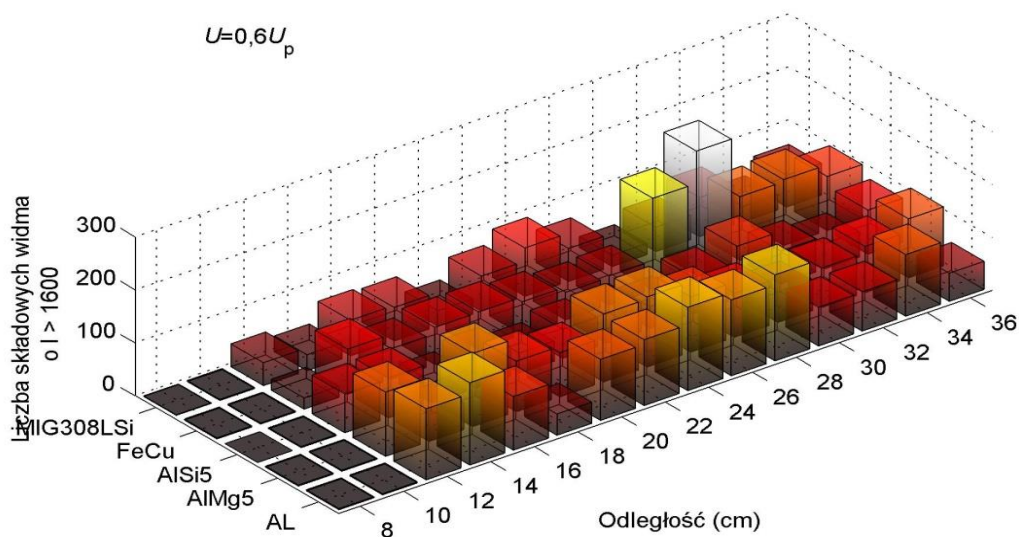
Rys. 7.37 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych odległości przy napięciu $0,4U_p$.

Na rys. 7.38 przedstawiono liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, emitowanych przez ułot generowany wokół powierzchni linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, podczas pomiarów przy różnych odległościach między przewodami linii dla wartości napięcia generacji ułotu odpowiadającej $0,5U_p$.



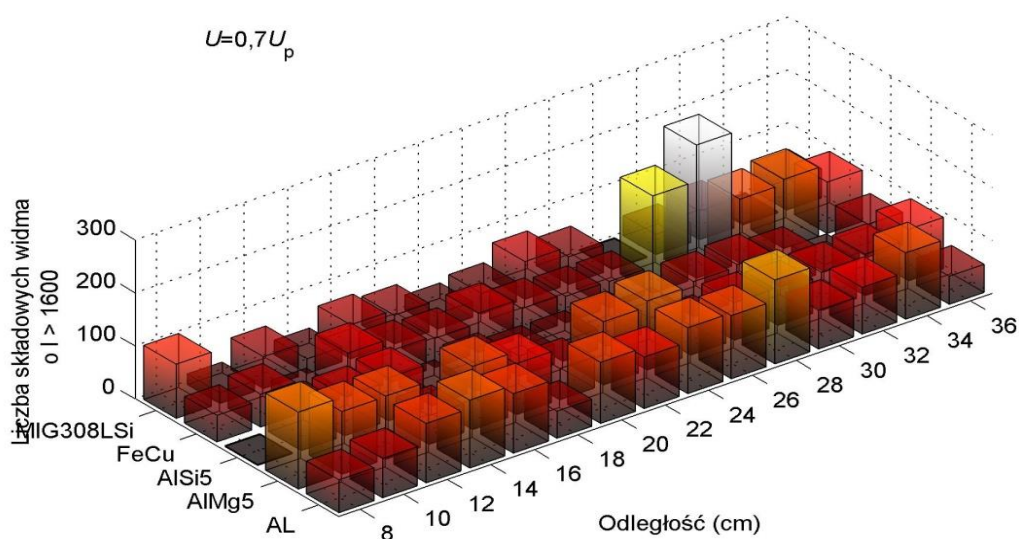
Rys. 7.38 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych odległości przy napięciu $0,5U_p$.

Na rys. 7.39 przedstawiono liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, podczas pomiarów przy różnych odległościach między przewodami linii dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,6U_p$.



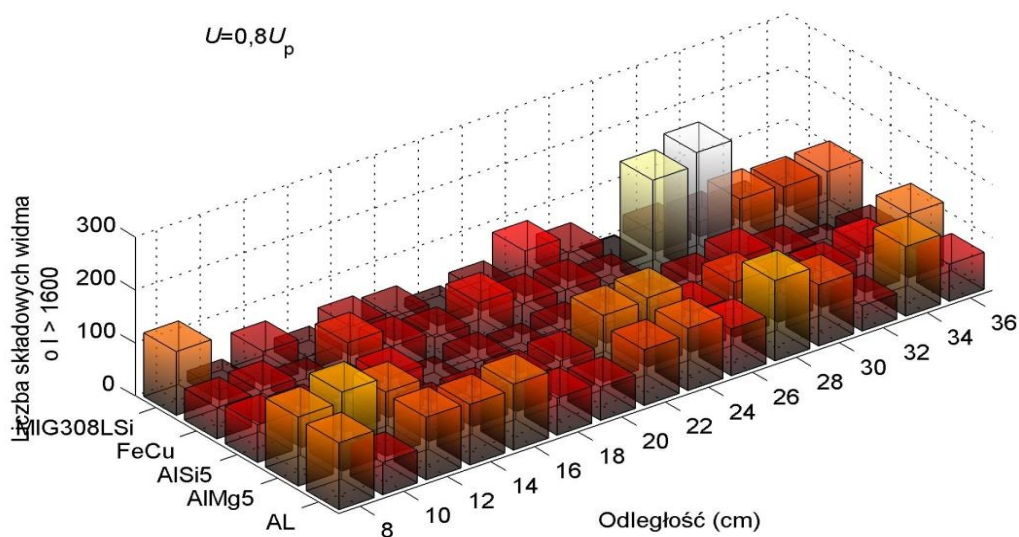
Rys. 7.39 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych odległości przy napięciu $0,6U_p$.

Na rys. 7.40 przedstawiono liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, podczas pomiarów przy różnych odległościach między przewodami linii dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,7U_p$.



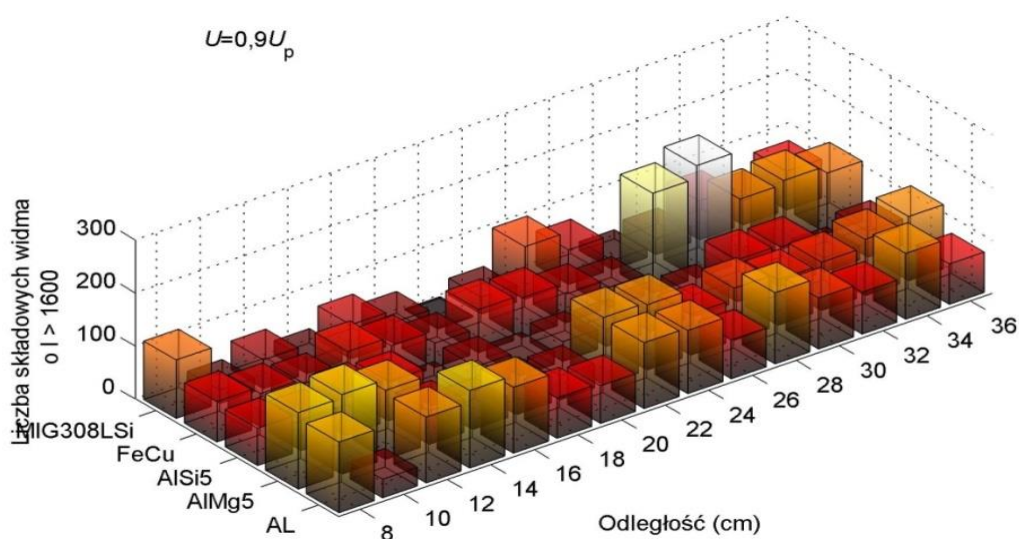
Rys. 7.40 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych odległości przy napięciu $0,7U_p$.

Na rys. 7.41 przedstawiono liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, podczas pomiarów przy różnych odległościach między przewodami linii dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,8U_p$.



Rys. 7.41 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych odległości przy napięciu $0,8U_p$.

Na rys. 7.42 przedstawiono liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, podczas pomiarów przy różnych odległościach między przewodami linii dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



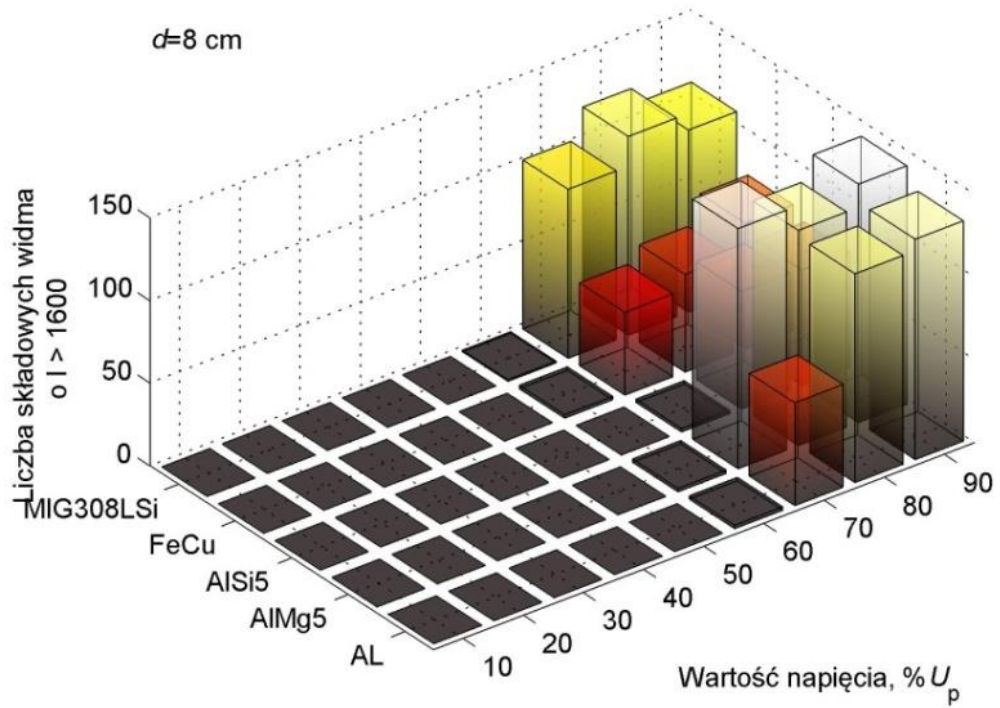
Rys. 7.42 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, dla różnych odległości przy napięciu $0,9U_p$.

7.4.4. Zależność liczby składowych widma od wartości napięcia generacji ulotu dla różnych odległości między przewodami linii wykonanymi z różnych materiałów

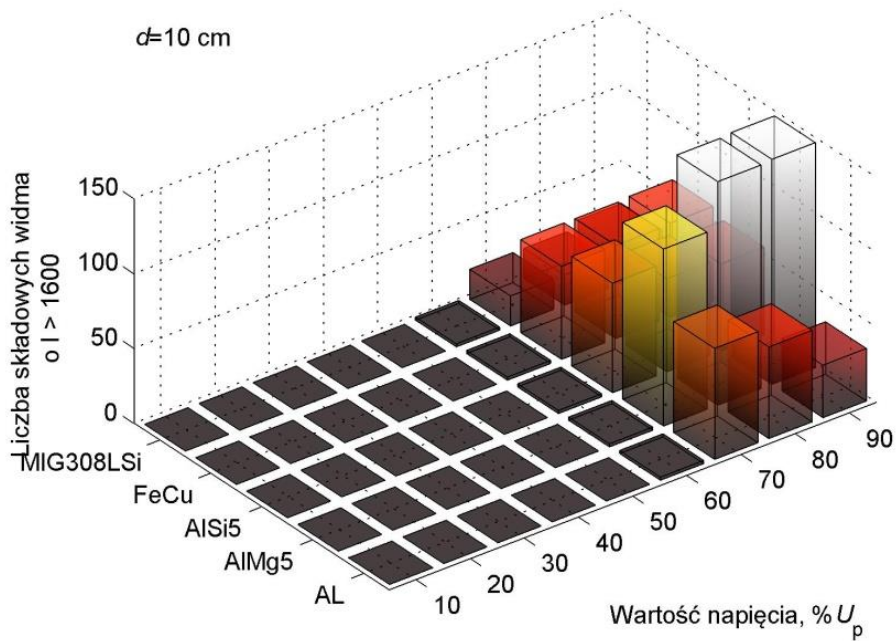
Na rys. 7.43 – 7.57 przedstawiono liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, podczas pomiarów dla dziewięciu różnych wartości napięcia generacji ulotu od 10% do 90% napięcia U_p przy piętnastu różnych odległościach między przewodami.

Na kolejnych rysunkach widać:

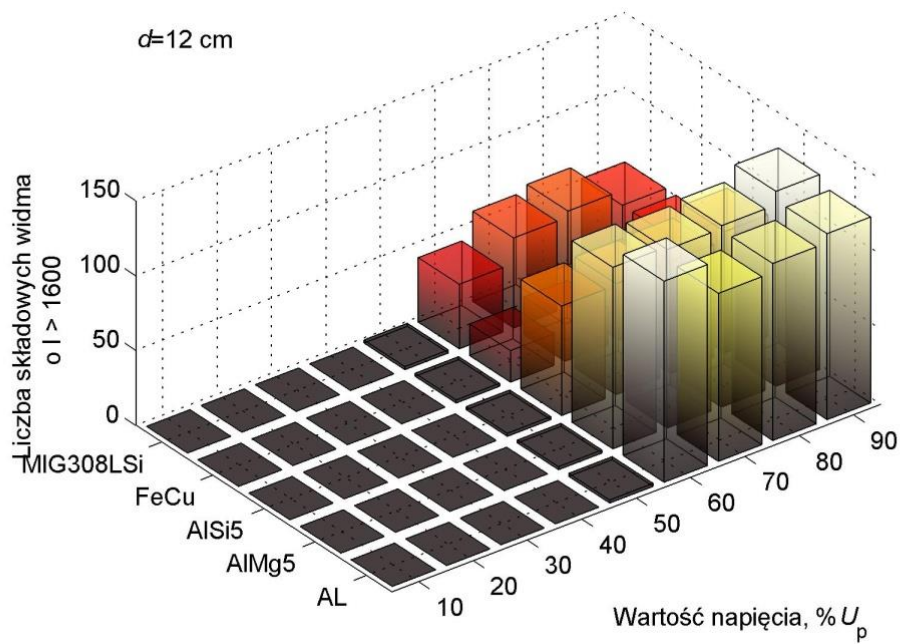
- rys. 7.43 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 8$ cm
- rys. 7.44 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 10$ cm
- rys. 7.45 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 12$ cm
- rys. 7.46 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 14$ cm
- rys. 7.47 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 16$ cm
- rys. 7.48 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 18$ cm
- rys. 7.49 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 20$ cm
- rys. 7.50 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 22$ cm
- rys. 7.51 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 24$ cm
- rys. 7.52 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 26$ cm
- rys. 7.53 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 28$ cm
- rys. 7.54 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 30$ cm
- rys. 7.55 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 32$ cm
- rys. 7.56 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 34$ cm
- rys. 7.57 - ilość składowych widma emisyjnego dla odległości $d = 36$ cm



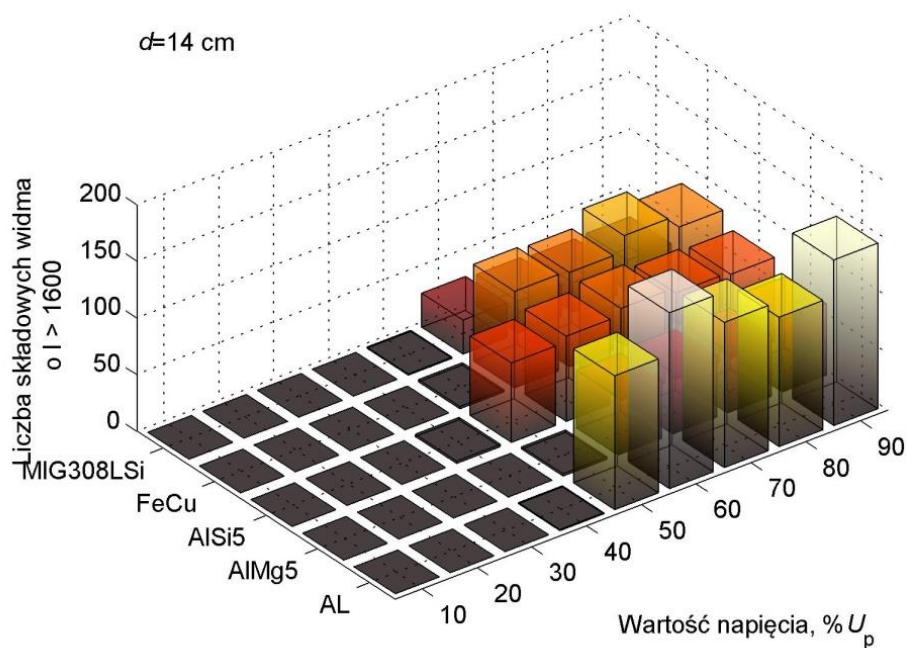
Rys. 7.43 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=8$ cm.



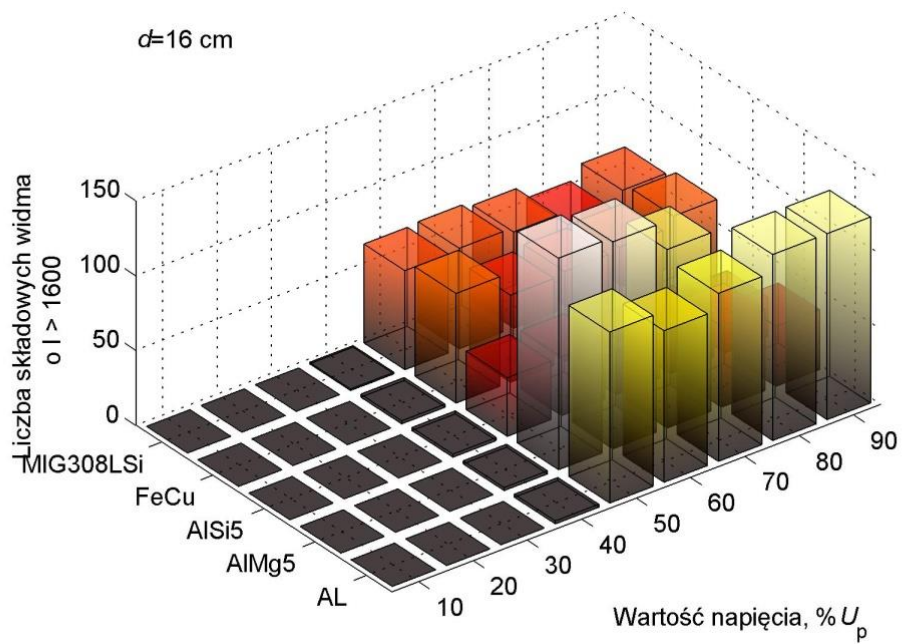
Rys. 7.44 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=10$ cm.



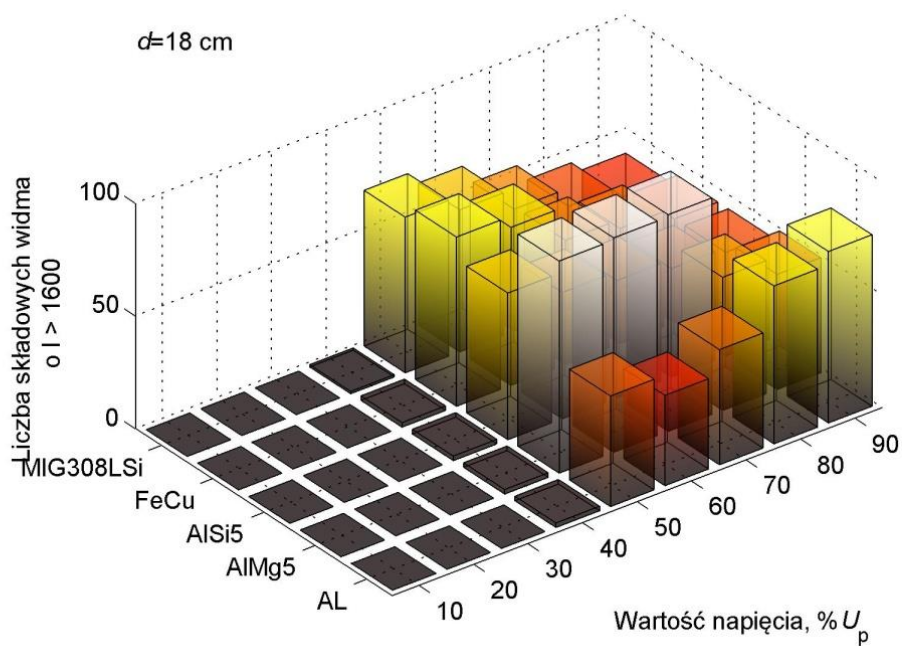
Rys. 7.45 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=12$ cm.



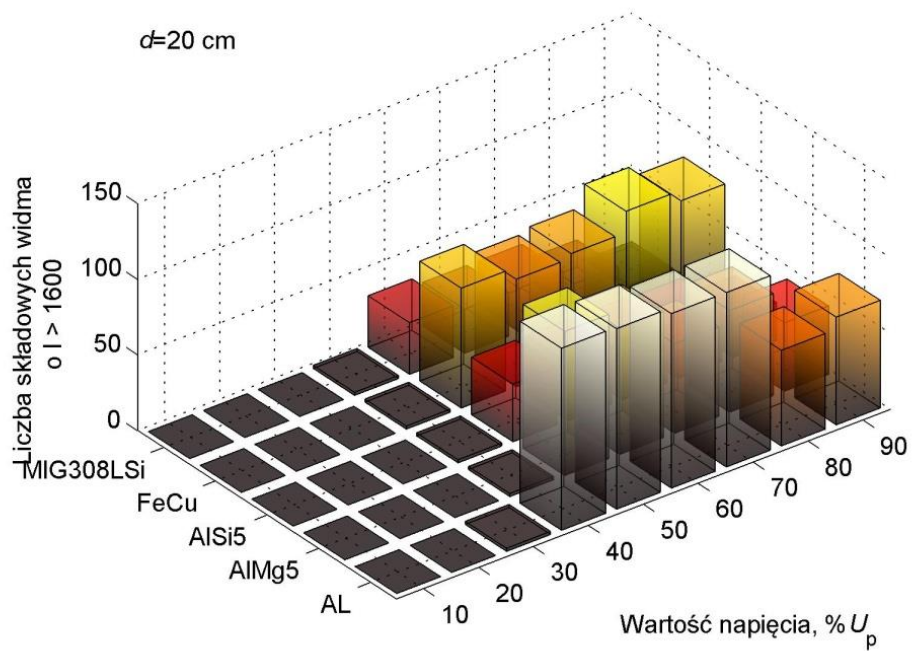
Rys. 7.46 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=14$ cm.



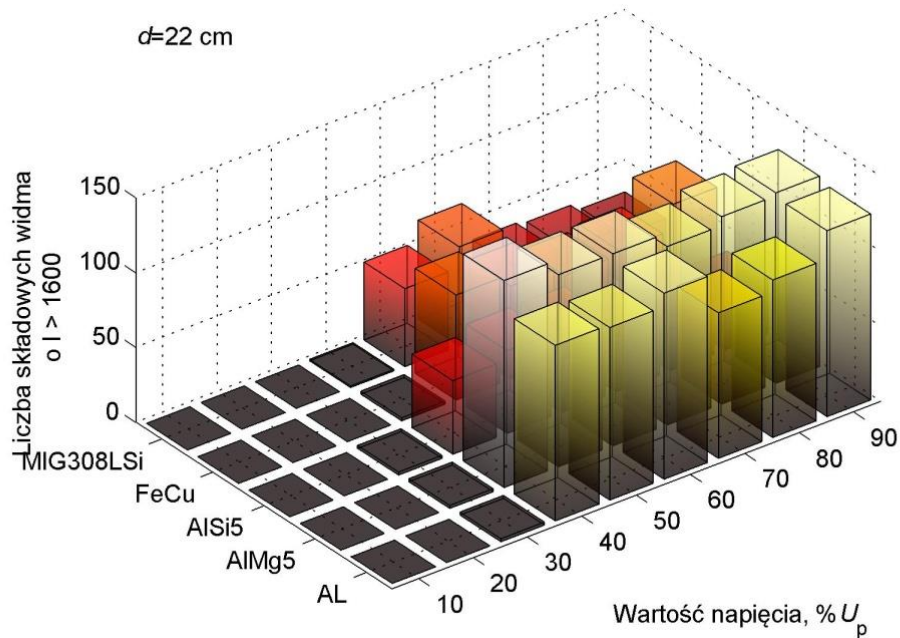
Rys. 7.47 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=16$ cm.



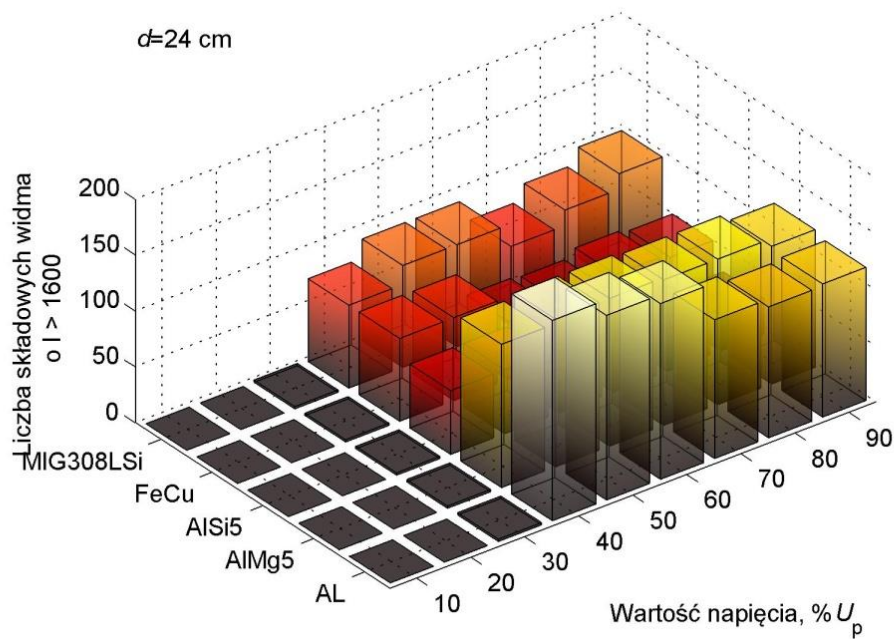
Rys. 7.48 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=18$ cm.



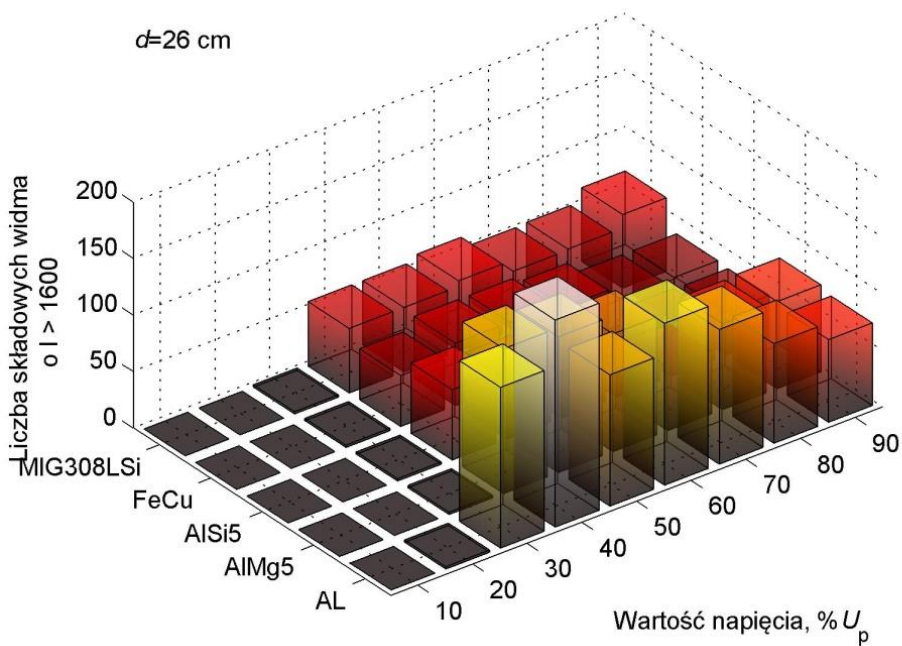
Rys. 7.49 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=20$ cm.



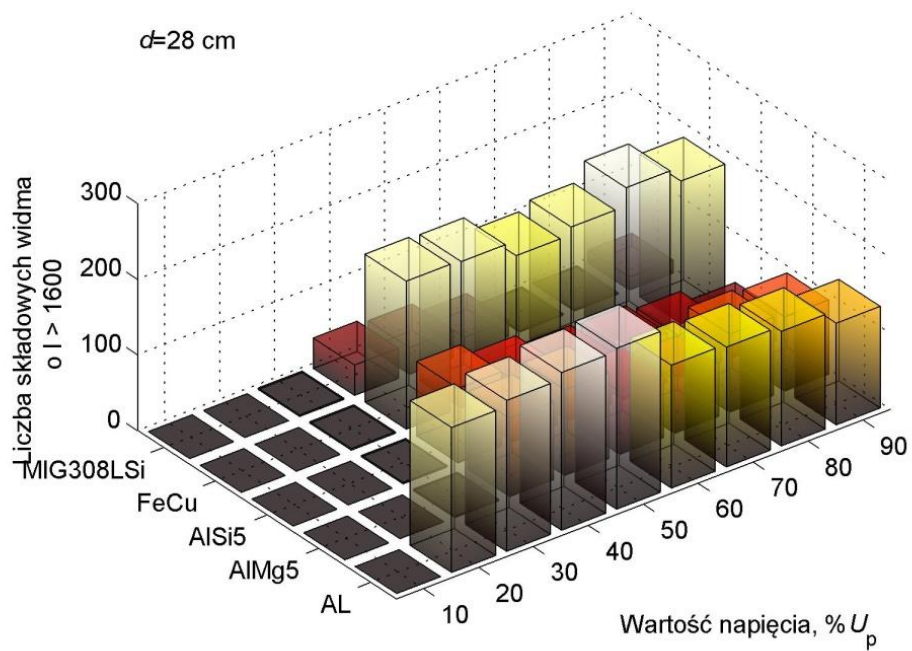
Rys. 7.50 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=22$ cm.



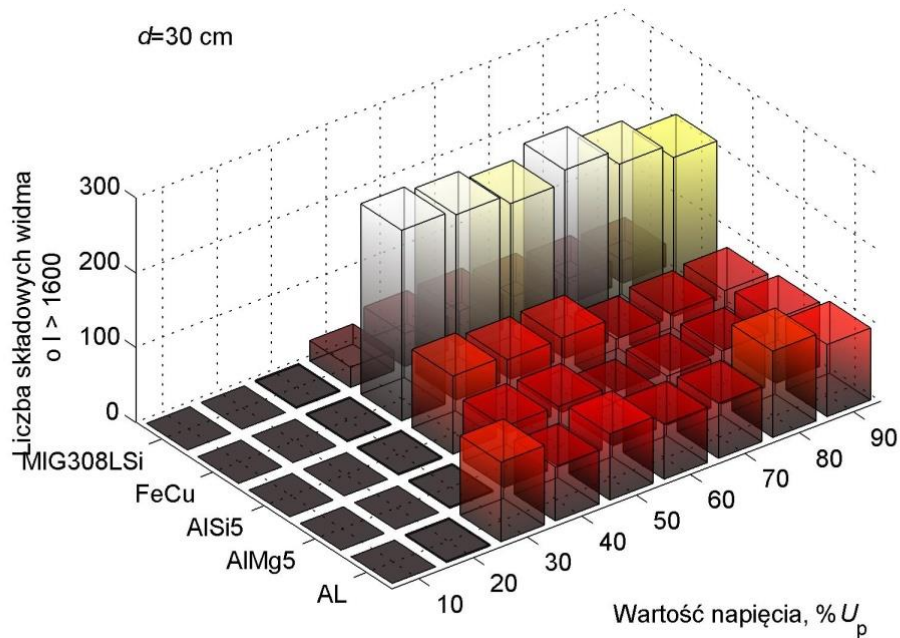
Rys. 7.51 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=24$ cm.



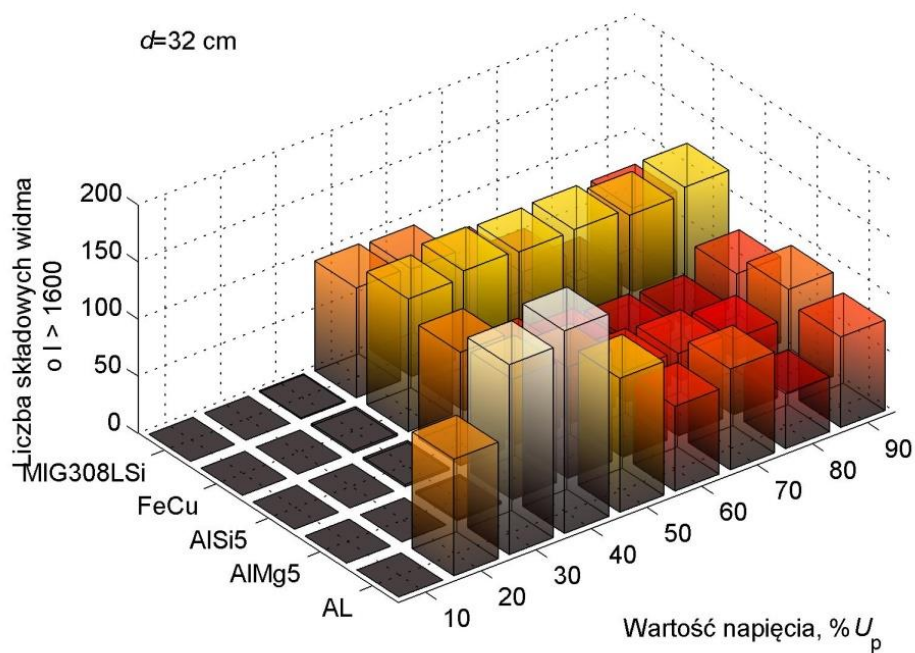
Rys. 7.52 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=26$ cm.



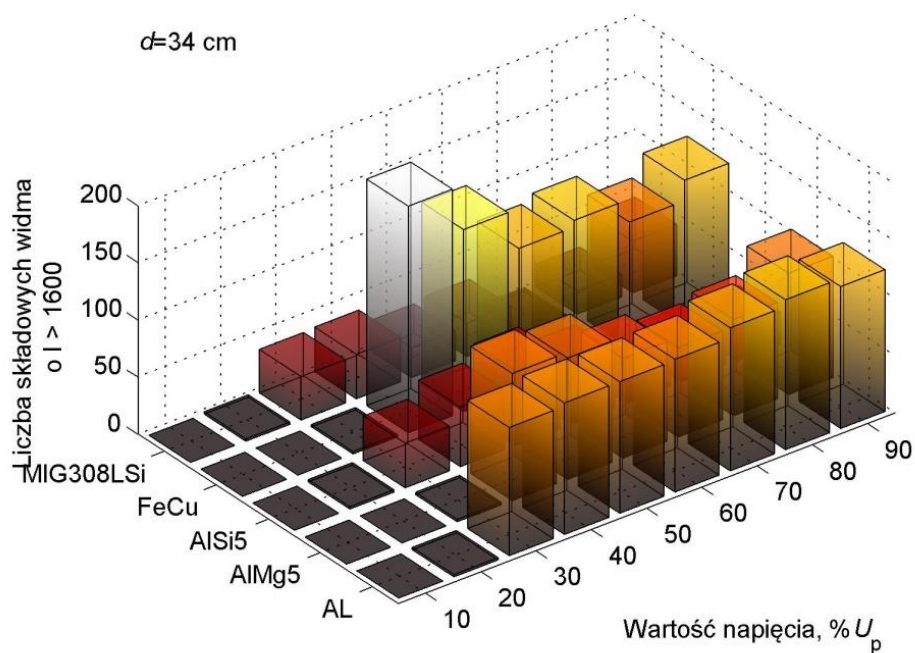
Rys. 7.53 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=28$ cm.



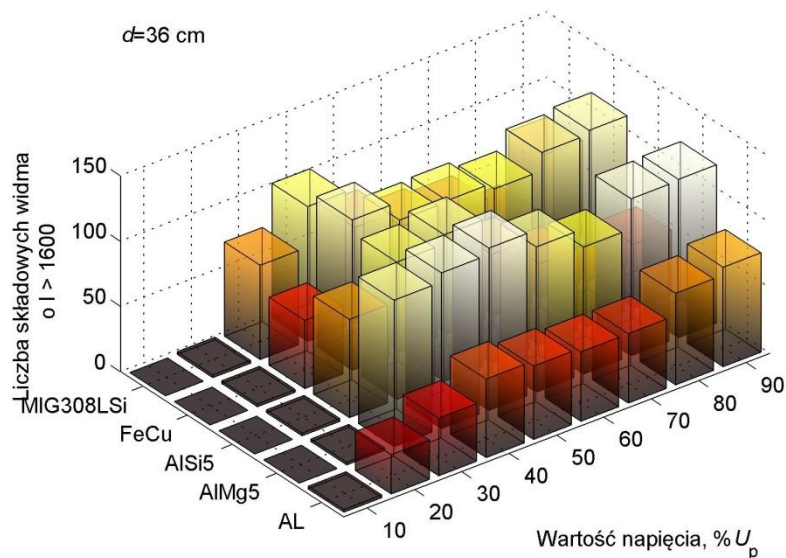
Rys. 7.54 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ułot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=30$ cm.



Rys. 7.55 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=32$ cm.



Rys. 7.56 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=34$ cm.



Rys. 7.57 Liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ emitowanego przez ulot generowany wokół linii wykonanych z pięciu różnych materiałów, w funkcji napięcia przy odległości $d=36$ cm.

7.5. Interpretacja i podsumowanie wyników analiz sygnałów optycznych zarejestrowanych metodą spektrofotometrii

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonych analiz sygnałów optycznych zarejestrowanych i przedstawionych w tym rozdziale rozprawy sformułowano następujące wnioski:

- Przebiegi widma intensywności wnz dla wszystkich badanych typów linii są do siebie podobne. Kształt widma zarejestrowanego ulotu jest podobny do sygnałów uzyskanych metodą spektrofotometrii emitowanych przez wnz generowane na izolatorach przepustowych i wsporczych [43,39,40] oraz na izolatorach wykonanych z porcelany [14,44].
- Z uwagi na stochastyczny charakter występowania zjawiska ulotu i uwzględniając jego wpływ na zmianę lokalnych warunków fizyko-chemicznych ośrodka występowania, dla każdej serii pomiarowej wykonano po 30 rejestracji widm optycznych. Na podstawie zestawień zbiorczych stwierdzono (rys.7.36 – 7.57), że w zależności od zmienianych parametrów układu pomiarowego, w tym odległości d między liniami i wartości napięcia generacji ulotu $\%U_p$, zaobserwowano mniej lub bardziej znaczące różnice w widmach dla poszczególnych serii pomiarowych.

- Dla wartości intensywności parametrów charakteryzujących widma uzyskanych w każdej z serii pomiarowej obliczono średnie arytmetyczne, wartość najwyższą (maksymalną) i wartość najmniejszą (minimalną). Zaobserwowano znaczące różnice między wartością maksymalną i minimalną, które nie zależały w sposób liniowy od wartości napięcia generacji ulotu $\% U_p$ ani odległości d . Do dalszych analiz wykorzystano zarówno wartość średnią obliczoną dla danej serii pomiarowej jak i wartość maksymalną.
- Widma uśrednionych wartości intensywności zarejestrowanych wnz przedstawiono na dwuwymiarowym spektrogramie w funkcji napięcia generacji ulotu. Ten rodzaj analizy pozwolił na określenie napięcia początkowego ulotu U_0 , które jest różne w zależności od zmienianych parametrów układu pomiarowego.
- Na podstawie uśrednionych wartości intensywności wyznaczono dla każdego widma wartości przekraczające 1600 zliczeń, $I > 1600$. Wartości te zaznaczono na trójwymiarowych spektrogramach w funkcji napięcia generacji ulotu jako procent wartości napięcia przebicia U_p . Taki rodzaj analizy pozwolił na wyróżnienie w widmie dominujących długości fal, które poddano dalszym analizom. W szczególności obliczono liczbę dominujących fal (oznaczono jako "liczba składowych widma dla $I > 1600$ "), którą przedstawiono w funkcji napięcia dla różnych odległości d i odwrotnie, tj. dla różnych wartości napięć w funkcji odległości d .
- Wykonano analizę występowania długości fal o intensywnościach $I > 1600$ dla każdego typu linii, dla wszystkich badanych napięć generacji ulotu wyrażonych jako procent wartości napięcia przebicia U_p i odległości d . Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że charakterystyczne długości fal pojawiają się w tych samych zakresach: 311-406 nm, 425 nm, 434 nm, 481 nm, 652 nm i 1040 nm. Obecność określonej długości zmienia się dla różnych wartości napięcia generacji i odległości d , ale nie wykryto zależności monotonicznej. Można z tego wywnioskować, że pojawiające się długości fal w rejestrowanym widmie nie zależą od materiału, z którego wykonane są przewody modelu linii elektroenergetycznej.
- Wykonano analizę obrazującą zależności liczby składowych i największych wartości intensywności w widmach rejestrowanych podczas pomiarów z wykorzystaniem badanych typów linii, które przedstawiono w funkcji odległości d i napięcia generacji ulotu wyrażonego jako procent wartości napięcia przebicia U_p . Zaobserwowano następujące zależności, które dotyczą wszystkich typów linii poddanych badaniu:
 - nie stwierdzono wpływu odległości jak i wartości napięcia generacji ulotu na liczbę składowych widma o $I > 1600$,

- wzrost odległości między przewodami powoduje obniżenie napięcia generacji ulotu powodującego emisję widma o intensywności $I > 1600$,
 - liczba składowych widma o intensywności $I > 1600$ wzrasta wraz ze wzrostem odległości podczas generacji ulotu, nie jest to zależność monotoniczna.
 - najwyższa zarejestrowana wartość intensywności widma nie przekroczyła wartości 15000, co warunkowane jest możliwościami technicznymi zastosowanej głowicy spektrofotometru.
- Dla uśrednionych i maksymalnych wartości intensywności w widmie obliczono dla każdej serii pomiarowej pole pod krzywą widma i oznaczono je jako energię sygnału (widma). Różnice między wartościami energii obliczonej dla średniej i maksymalnej wartości były różne i nie zależały w sposób liniowy od zmienianych wartości odległości d i napięcia generacji $\%U_p$.
 - Dla każdego typu linii, wartości energii sygnału obliczone z uśrednionych intensywności przedstawiono na trójwymiarowym wykresie obrazującym jej zależność w funkcji odległości d i napięcia generacji ulotu $\%U_p$. Na podstawie tego typu analizy stwierdzono, że:
 - dla linii AL najniższe wartości energii uzyskano dla najmniejszej wartości napięcia generacji, natomiast energia rośnie wraz ze wzrostem napięcia. Zależność ta nie jest liniowa i nie występuje dla wszystkich odległości d . Energia utrzymuje się na stałym poziomie dla najniższych wartości napięcia generacji i jest jednakowa dla wszystkich odległości. Dla najwyższych wartości napięcia generacji ulotu nie zaobserwowano liniowej zależności od odległości d . Najwyższe wartości energii przekraczające wartość $3e^6$ obliczono dla odległości $d=28$ cm dla $\%U_p$ w zakresie 20-50.
 - dla linii AlMg5 najniższe wartości energii uzyskano dla najmniejszej wartości napięcia generacji, natomiast energia rośnie wraz ze wzrostem napięcia. Zależność ta nie jest liniowa i nie występuje dla wszystkich odległości d . Energia utrzymuje się na stałym poziomie dla najniższych wartości napięcia generacji i jest jednakowa dla wszystkich odległości. Dla wyższych i najwyższych wartości napięcia generacji ulotu nie zaobserwowano liniowej zależności od odległości d . Najwyższe wartości energii przekraczające wartość $2,5e^6$ obliczono dla odległości $d=\{8,10,16, 22, 24, 26\}$ cm.
 - dla linii AlSi5 najniższe wartości energii uzyskano dla najmniejszej wartości napięcia generacji, natomiast energia rośnie wraz ze wzrostem napięcia. Zależność ta nie jest liniowa i nie występuje dla wszystkich odległości d . Energia utrzymuje się na stałym poziomie dla najniższych wartości napięcia generacji i jest jednakowa dla wszystkich

odległości. Dla wyższych i najwyższych wartości napięcia generacji ulotu energia utrzymuje się na podobnym poziomie ok. $2e^6$ dla odległości 8-26 cm i rośnie w zakresie $d=\{28-35\}$ cm dla napięć w zakresie 30-60 % U_p .

- dla linii FeCu najniższe wartości energii uzyskano dla najmniejszej wartości napięcia generacji, natomiast energia rośnie wraz ze wzrostem napięcia. Dla wyższych i najwyższych wartości napięcia generacji ulotu energia utrzymuje się na podobnym poziomie ok. $2-2,5 e^6$ dla odległości 8-26 cm i znacząco rośnie w zakresie $d=28-35$ cm dla napięć powyżej 30 % U_p osiągając wartości sięgające $4 e^6$.
- dla linii MIG308LSi najniższe wartości energii uzyskano dla najmniejszej wartości napięcia generacji, a energia rośnie wraz ze wzrostem napięcia. Dla wyższych i najwyższych wartości napięcia generacji ulotu energia utrzymuje się na podobnym poziomie ok. $2 e^6$. Najwyższe wartości sięgające $2,5 e^6$ uzyskano dla odległości $d=\{8, 24, 35\}$ cm.
- Wartości najwyższych intensywności zarejestrowane w widmach emitowanych przez wszystkie badane rodzaje linii zestawiono na jednym wykresie (rys.7.13 – 7.35) i dokonano ich porównania uwzględniając zależność od odległości d i zależność od wartości procentowej napięcia przebiccia U_p . Na podstawie tego typu analizy stwierdzono, że:
 - największa intensywność zarejestrowanych widm występuje dla linii wykonanych z aluminium, zarówno dla aluminium domieszkowanego jak i czystego.
 - najmniejsza intensywność zarejestrowanych widm występuje dla linii wykonanych ze stali nierdzewnej, oznaczonej jako MIG308LSi.
 - odległość między liniami nie wpływa w sposób liniowy na wartość najwyższej intensywności rejestrowanych widm.
- Liczbę składowych widma przekraczających wartość $I > 1600$ przedstawiono w funkcji badanych parametrów d i wartości procentowej napięcia przebiccia U_p . Zaobserwowano liniową zależność liczby składowych widma z wartościami najwyższej intensywności, gdy rozpatrywano te wartości dla poszczególnych odległości d i napięć % U_p . Uśredniona wartość liniowej korelacji, którą obliczono przy wykorzystaniu współczynnika Pearsona dla poszczególnych serii pomiarowych, wyniosła 7,48.

8. Analiza i interpretacja wyników pomiarów emisji świetlnej zarejestrowanych kamerą w zakresie UV

8.1. Numeryczne metody i programy wykorzystane w analizie i interpretacji zarejestrowanych wyników

Do analizy uzyskanych sygnałów wykorzystano środowisko programistyczne MATLAB. Poniżej przedstawiono przykładowe listingi dwóch procedur obliczeniowych.

- Generowanie obrazu zestawienia zbiorczego wszystkich zarejestrowanych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot w funkcji napięcia generacji:

```
clear all
clc
home_matlab = pwd;
cd ..
temp = pwd;
source = [temp '\maty_UV\'];
folder_rysunki = [ temp '\obrazy_UV\'];
nazwa_ukladu = {'AL', 'AlMg5', 'AlSi5', 'FeCu', 'MIG308LSi'};
font_ = 10;
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
figure('Position', [100 scrsz(4)/2-100 scrsz(3)/2 scrsz(4)/3]);
grid on; grid minor;

for NrUkladu = 1:5
    clear lista_plikow
    cd(source);
    cd(nazwa_ukladu{NrUkladu});
    lista_plikow = dir;

    for NrPliku = length(lista_plikow); % nr pliki z dla kolejnej
    odleglosci
    %     nazwa_odleglosci=str2num(lista_plikow(NrPliku).name(1:2));

        cd(source);
        cd(nazwa_ukladu{NrUkladu});
        odl_temp=lista_plikow(NrPliku).name;
        run(odl_temp(1:end-2))
        odlegl_nazwa = odl_temp(6:end-2);
        % generuj macierz dla poszczególnych wektorów z wynikami
        j=1; wyniki=[];
        for i=1:9
            nazwa_temp{i, :} = [ nazwa_ukladu{NrUkladu} '_0' num2str(i)
];

            if (exist(nazwa_temp{i, :}))
                wyniki(j, :) = eval(nazwa_temp{i, :});
                wartosc_napiecia(j, :) = [ num2str(i*10) ];
                j=j+1;
            end
        end
    end
end
```

```

% rysowanie surface
close all
figure(1);clf; set(gca,'fontsize',16); colorbar
h=surf(wyniki, 'Parent',gca, 'LineStyle','none', 'FaceColor','interp', 'FaceAlpha',0.8);

j=0;[dl, len] = size(wyniki);
for ii=1:len
    xtick_(ii) = j; j=j+4;end
space = 1:4:len;
set(gca, 'xticklabel',xtick_(space));
set(gca, 'xtick', space);
ylabel('Wartość napięcia, %\itU\rm_p','fontsize',font_);
xlabel('Czas rejestracji, s','fontsize',font_);
zlabel('Liczba zliczeń, -','fontsize',font_);hcol = colorbar;
set(gca, 'ytick',1:1:dl);
set(gca, 'yticklabel',wartosc_napiecia);
colormap winter
set(colorbar, 'fontsize',8) ; h = get(colorbar, 'ylabel');
set(h, 'string', 'Liczba zliczeń (-)');
h=annotation('textbox',[0.58 0.90 0.1
0.1]);set(h, 'linestyle','none');
set(h, 'string', [ '\bf typ: ' nazwa_ukladu{NrUkladu} ', \itd\rm
=\bf' odlegl_nazwa]);
set(gca, 'fontsize',font_); set(h, 'fontsize',font_);
nazwaPomiaru = [nazwa_ukladu{NrUkladu} '_' odlegl_nazwa] ;
set(gcf, 'PaperPosition',[1 1 17 10]);%dopasowanie tego co sie potem
wydrukuj
cd ..
cd(folder_rysunki);
mkdir([nazwa_ukladu{NrUkladu} '\surf']);
cd([nazwa_ukladu{NrUkladu} '\surf']);
print(gcf, '-djpeg', '-r1200', nazwaPomiaru);
clf;
end
end

```

- Generowanie obrazu wartości średniej liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich rozpatrywanych odległości d .

```

clear all
clc
home_matlab = pwd;
cd ..
temp = pwd;
source = [temp '\maty_UV\'];
folder_rysunki = [ temp '\obrazy_UV\'];
nazwa_ukladu = {'AL', 'AlMg5', 'AlSi5', 'FeCu', 'MIG308LSi'};
close all
font_ = 10;
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
figure('Position',[100 scrsz(4)/2-100 scrsz(3)/2 scrsz(4)/3]);
grid on;grid minor;

for NrUkladu = 1:5
    clear lista_plikow nazwa_odleglosci
    cd(source);

    cd(nazwa_ukladu{NrUkladu});
    lista_plikow = dir;

```

```

wartosc_napiecia=[];
wyniki=[];    NrPliku_index=1;
    for NrPliku = 3 : length(lista_plikow);    % nr pliki z dla kolejnej
odleglosci

nazwa_odleglosci(NrPliku_index,:)=str2num(lista_plikow(NrPliku).name(6:7));

    cd(source);
    cd(nazwa_ukladu{NrUkladu});
    odl_temp=lista_plikow(NrPliku).name;
    run(odl_temp(1:end-2))
    odlegl_nazwa = odl_temp(6:end-2);
    % generuj macierz dla poszczególnych wektorów z wynikami

    for i=1:9
        nazwa_temp{i,:} = [ nazwa_ukladu{NrUkladu} '_0' num2str(i) ];
        if (exist(nazwa_temp{i,:}))
            wyniki_temp = eval(nazwa_temp{i,:});
            wyniki(NrPliku_index,i,:) = mean( wyniki_temp);
            wartosc_napiecia(NrPliku_index,i,:) = [ (i*10) ];
        end
    end
    NrPliku_index = NrPliku_index+1;
end
[S1, S2] = size( wyniki);
%rysowanie
for i=1:(S2)
    WN{i,:} = num2str(wartosc_napiecia(S1,i));
end
% rysowanie zestawienia dla napieci
h=bar3(wyniki);
set(h(:), 'FaceAlpha',0.5)
shading interp
    for i = 1:length(h)
        zdata = get(h(i), 'Zdata');
        set(h(i), 'Cdata',zdata)
        set(h, 'EdgeColor', 'k')
    end
colormap hot
set(gca, 'fontsize', font_); colorbar
xlabel('Wartość napięcia, %\itU\rm_p', 'fontsize', font_);
ylabel('Odległość, cm', 'fontsize', font_);
zlabel('Średnia liczba zliczeń, -', 'fontsize', font_);
set(gca, 'xtick', 1:1:9);
set(gca, 'xticklabel', 10:10:90); set(gca, 'yticklabel', nazwa_odleglosci);
colormap hot
set(colorbar, 'fontsize', 8) ; h = get(colorbar, 'ylabel');
set(h, 'string', 'Liczba zliczeń (-)');
h=annotation('textbox', [0.58 0.86 0.1 0.1]);set(h, 'linestyle', 'none');
set(h, 'string', [ '\bf typ: ' nazwa_ukladu{NrUkladu} ]);
set(gca, 'fontsize', font_); set(h, 'fontsize', font_);
nazwaPomiaru = [nazwa_ukladu{NrUkladu}] ;
set(gcf, 'PaperPosition', [1 1 22 15]);%dopasowanie tego co sie potem
wydrukuj
ylim([0.5 S1+.5]);xlim([0.5 S2+.5]);
cd ..
cd(folder_rysunki);
mkdir([nazwa_ukladu{NrUkladu} '\zestaw_1']);
cd([nazwa_ukladu{NrUkladu} '\zestaw_1']);
print(gcf, '-djpeg', '-r1200', nazwaPomiaru);
clf;

```

close all

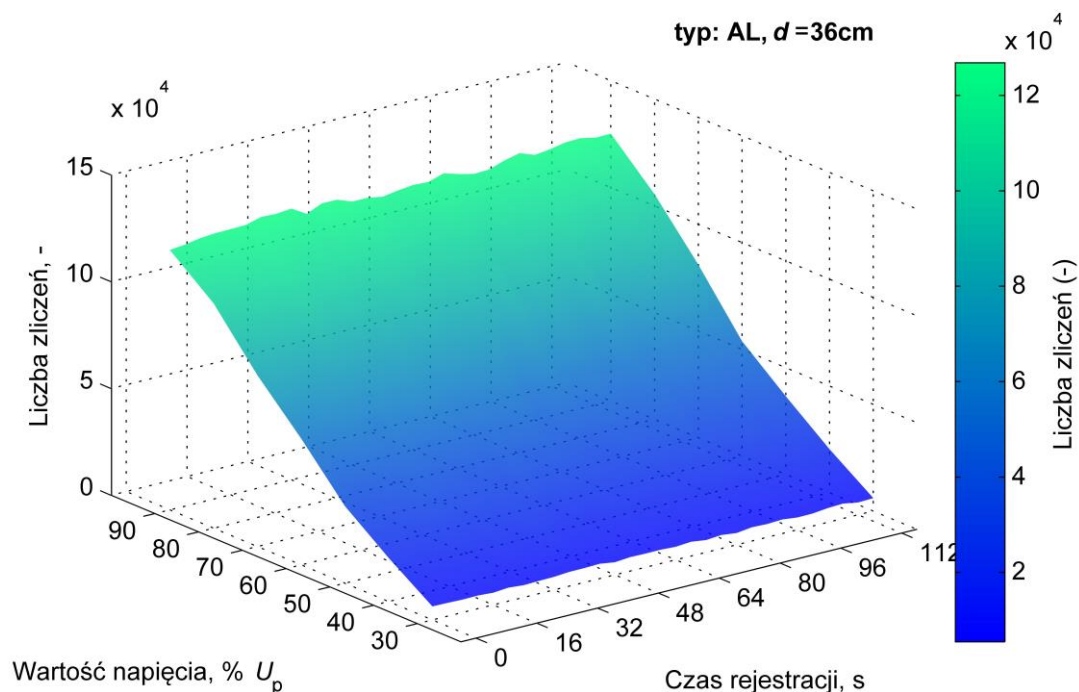
end

Listingi wszystkich procedur obliczeniowych znajdują się w załączniku nr 2 do niniejszej pracy na dołączonej płycie.

8.2. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanych z różnych materiałów

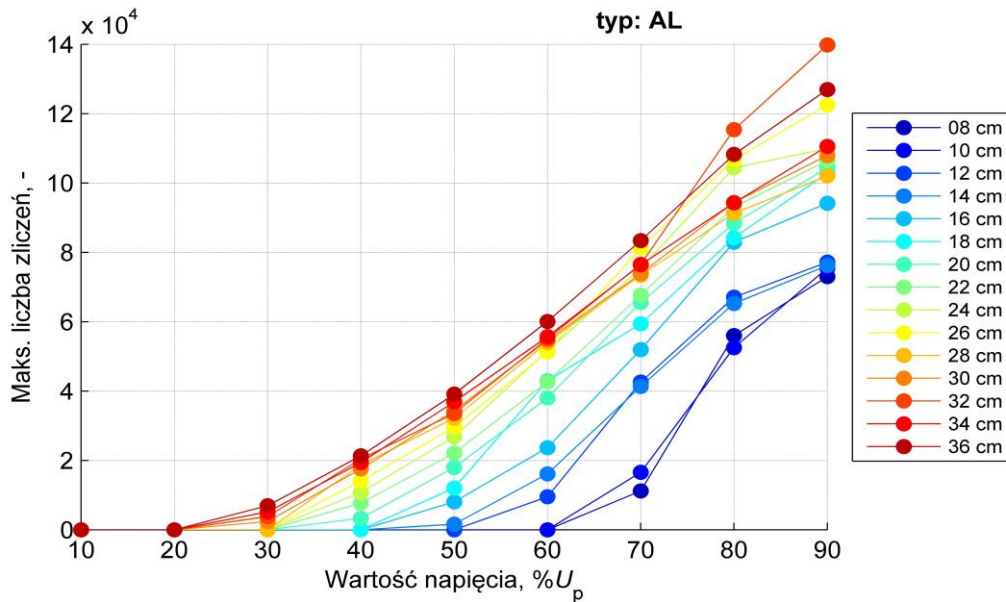
8.2.1. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej z aluminium, typ AL

Na rys. 8.1 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium, podczas pomiarów przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, w funkcji napięcia generacji ulotu.



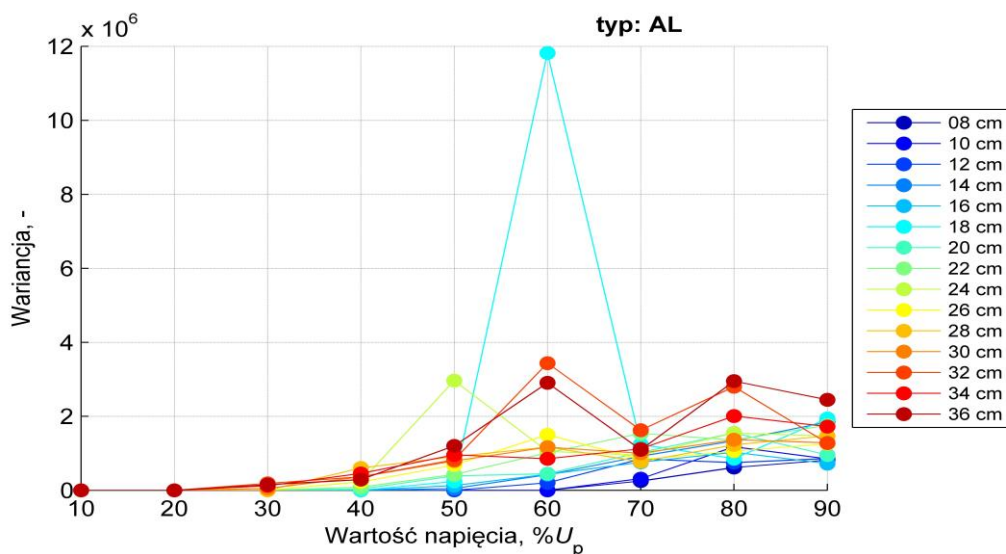
Rys. 8.1 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot w funkcji napięcia generacji, przy odległości $d=36$ cm.

Dla wartości liczby zliczeń uzyskanych z 30 pomiarów obliczono wartości średniej arytmetycznej, wartości najwyższe i wariancje. Na rys. 8.2 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium, przy różnych odległościach między przewodami w układzie d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



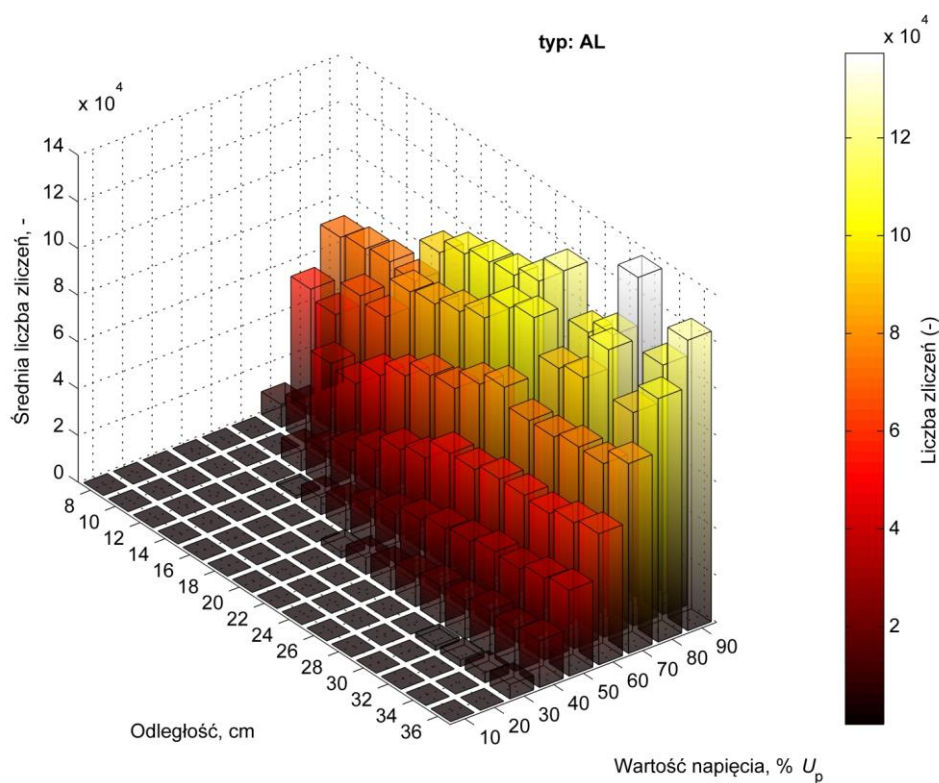
Rys. 8.2 Najwyższe wartości liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

Na rys. 8.3 przedstawiono zestawienie zbiorcze wariancji liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe przy różnych odległościach d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



Rys. 8.3 Wartości wariancji liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

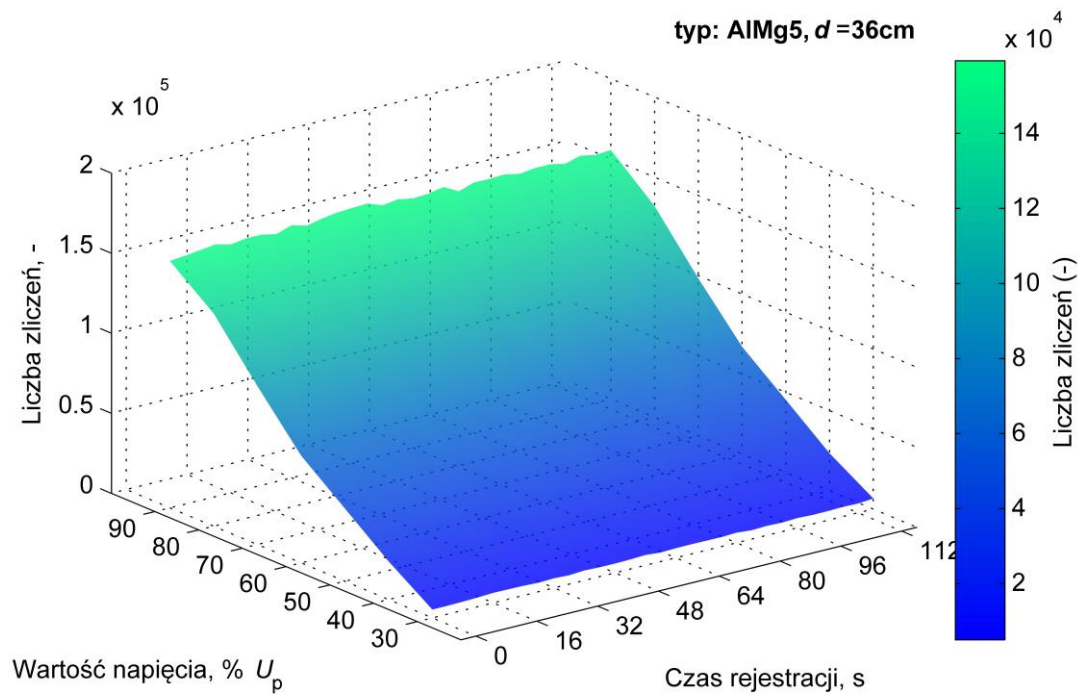
Na rys. 8.4 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych w funkcji napięcia generacji i odległości d .



Rys. 8.4 Wartości średnie liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

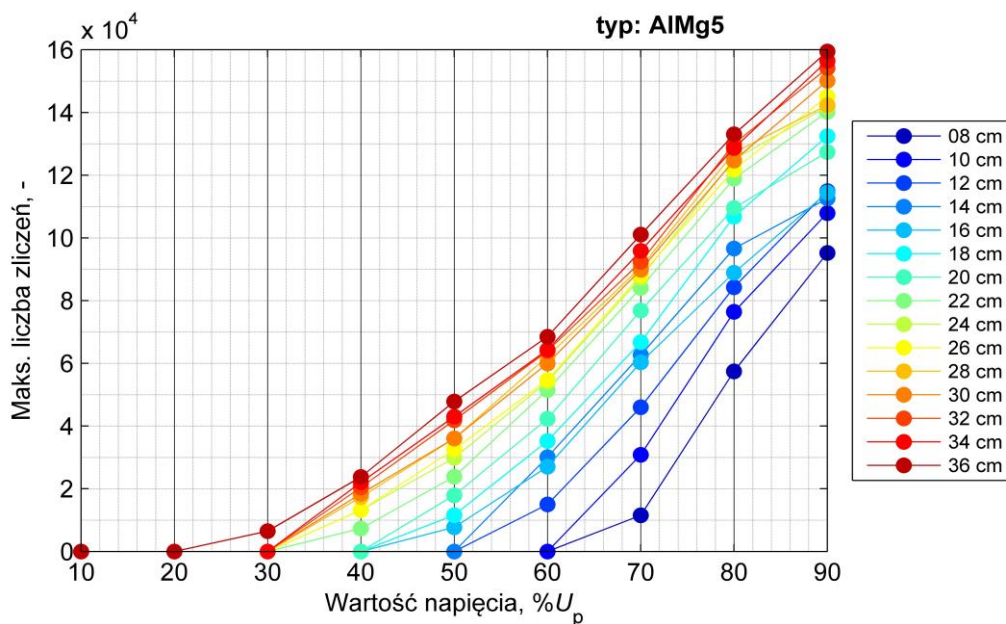
8.2.2. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, typ AlMg5

Na rys. 8.5 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu podczas pomiarów przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, w funkcji napięcia generacji ulotu.



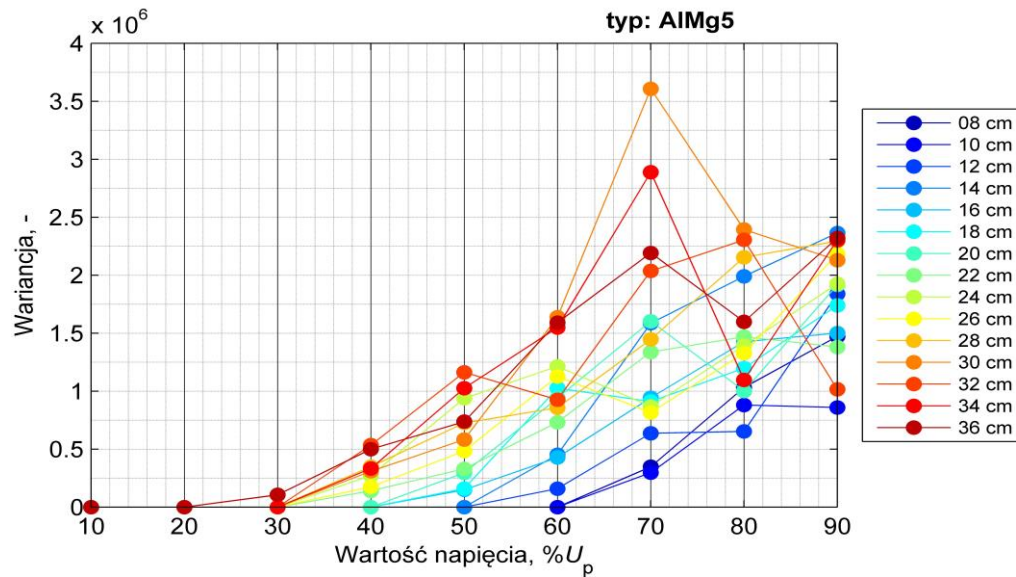
Rys. 8.5 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot w funkcji napięcia generacji, przy odległości $d=36\text{cm}$.

Na rys. 8.6 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni badanej linii przy różnych odległościach między przewodami linii w układzie d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



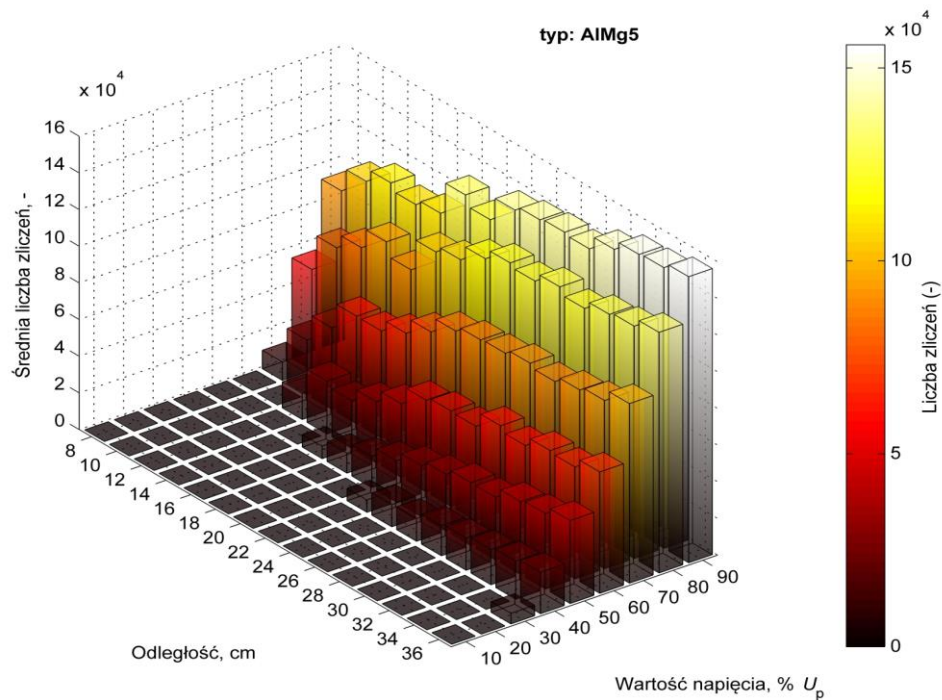
Rys. 8.6 Najwyższe wartości liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

Na rys. 8.7 przedstawiono zestawienie zbiorcze wariancji liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe przy różnych odległościach d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



Rys. 8.7 Wartości wariancji liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

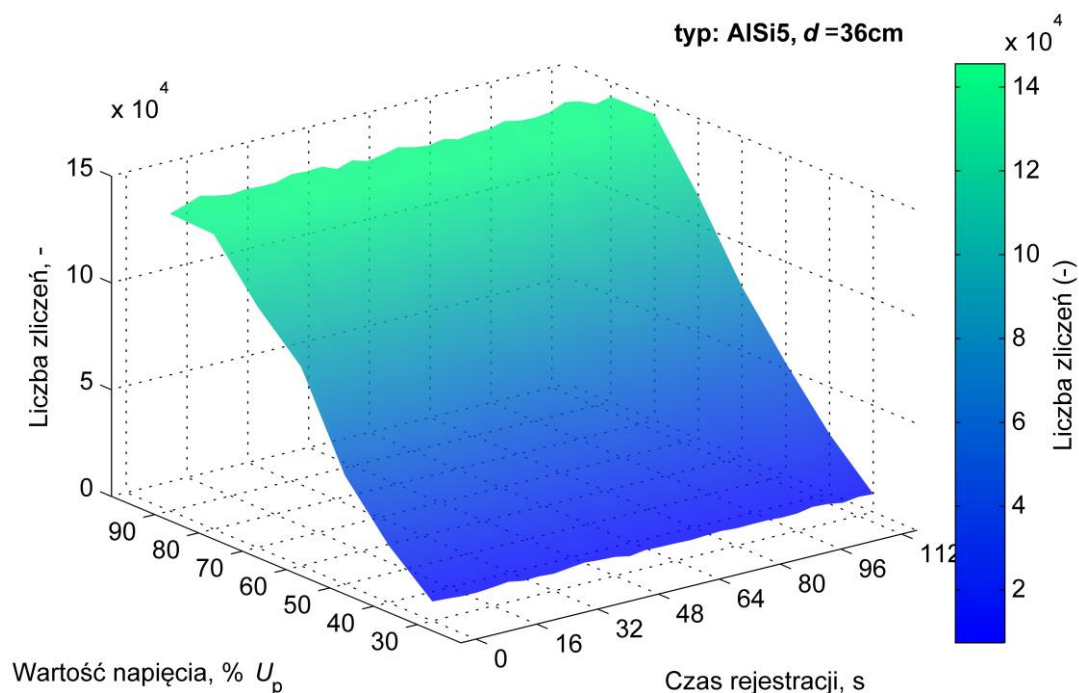
Na rys. 8.8 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych, w funkcji napięcia generacji i odległości d .



Rys. 8.8 Wartości średnie liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

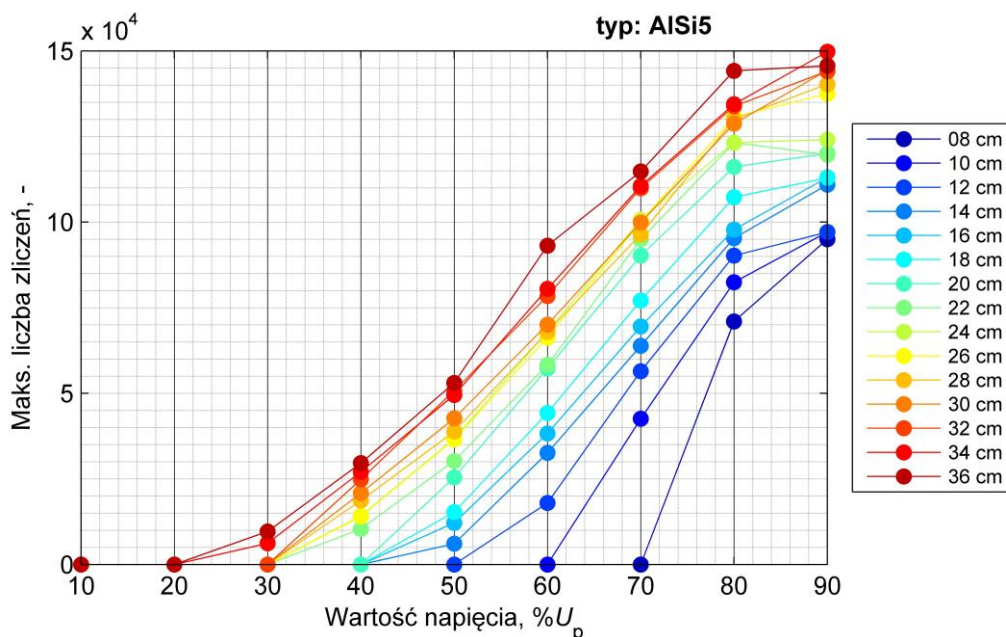
8.2.3. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu, typ AlSi5

Na rys. 8.9 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu podczas pomiarów przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, w funkcji napięcia generacji ulotu.



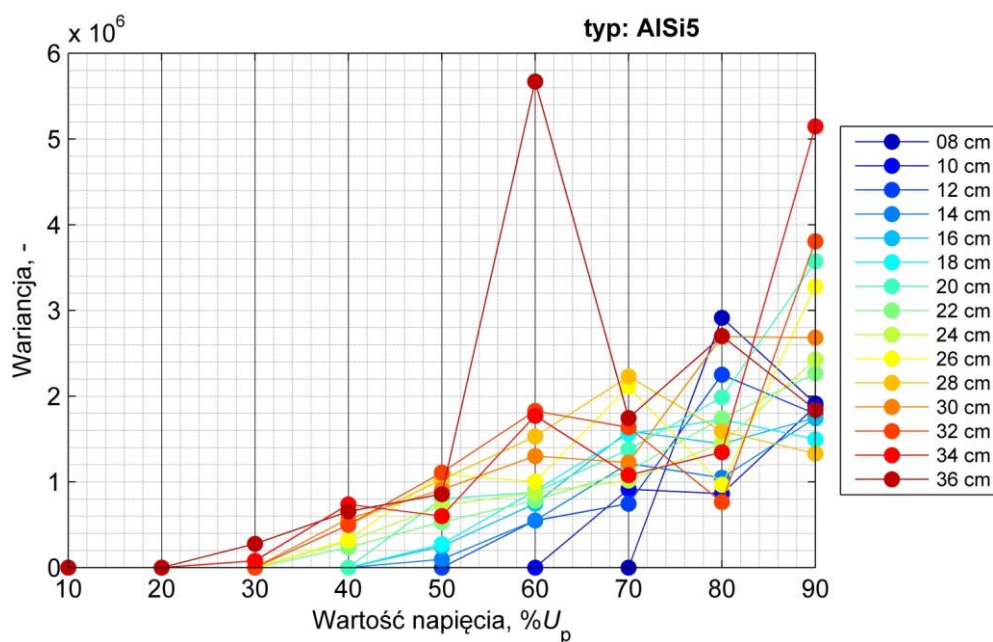
Rys. 8.9 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot w funkcji napięcia generacji przy odległości $d=36$ cm.

Na rys. 8.10 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii przy różnych odległościach między przewodami linii w układzie d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



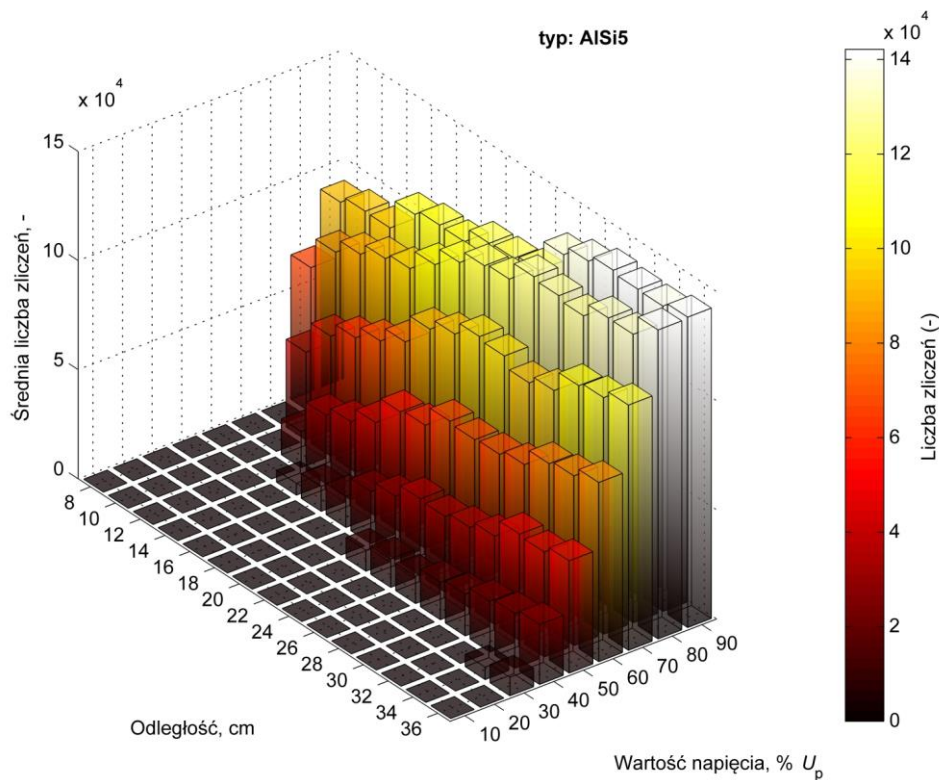
Rys. 8.10 Najwyższe wartości liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

Na rys. 8.11 przedstawiono zestawienie zbiorcze wariacji liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe przy różnych odległościach d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



Rys. 8.11 Wartości wariacji liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

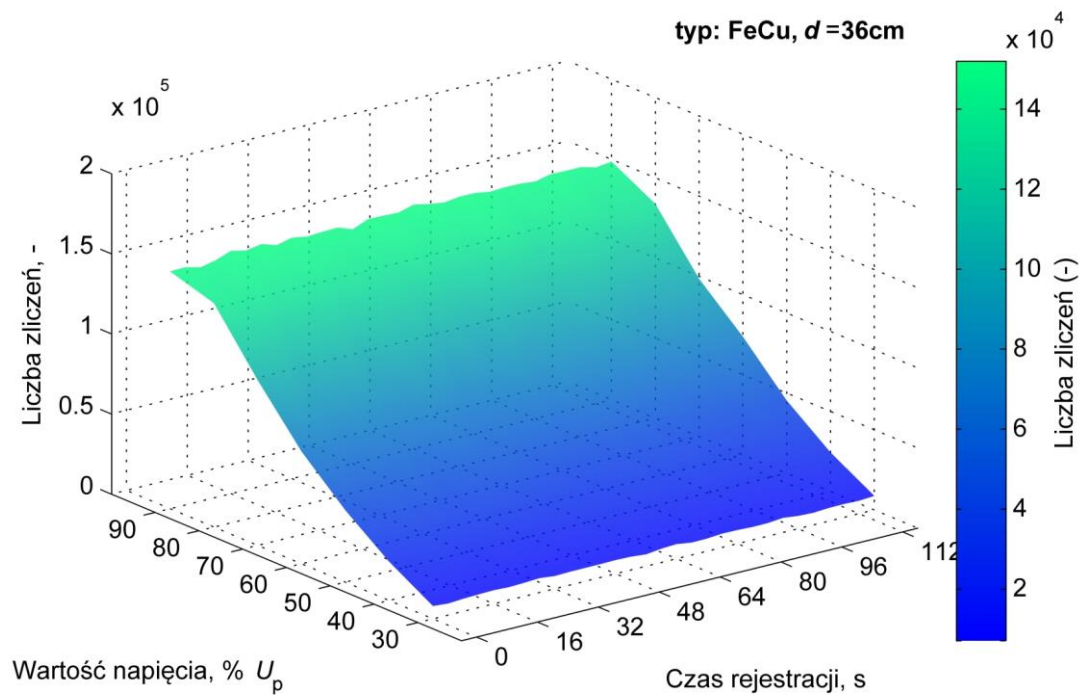
Na rys. 8.12 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych w funkcji napięcia generacji i odległości d .



Rys. 8.12 Wartości średnie liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

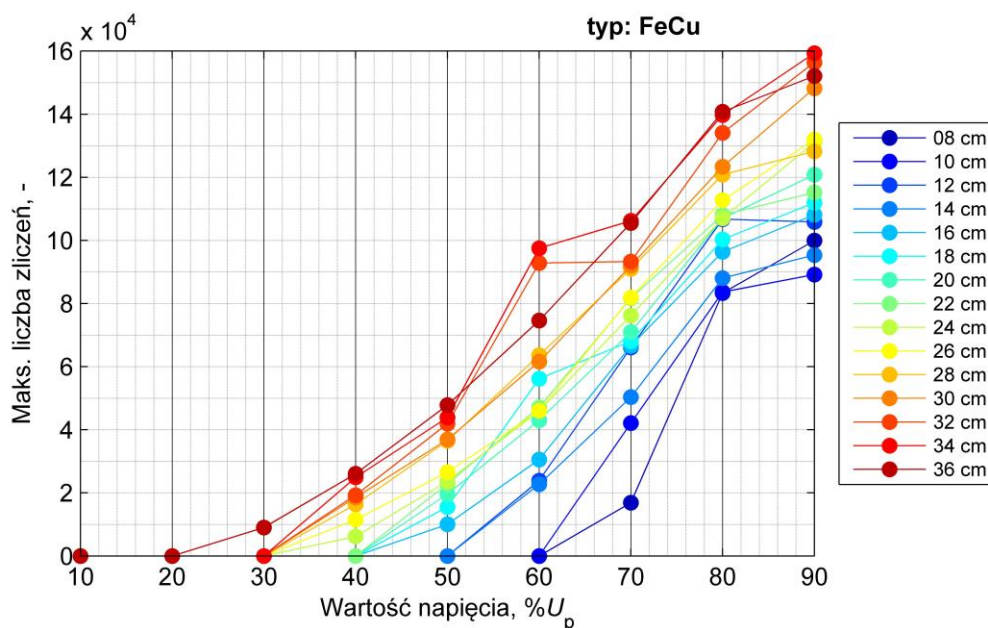
8.2.4. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, typ FeCu

Na rys. 8.13 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, podczas pomiarów przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm w funkcji napięcia generacji ulotu.



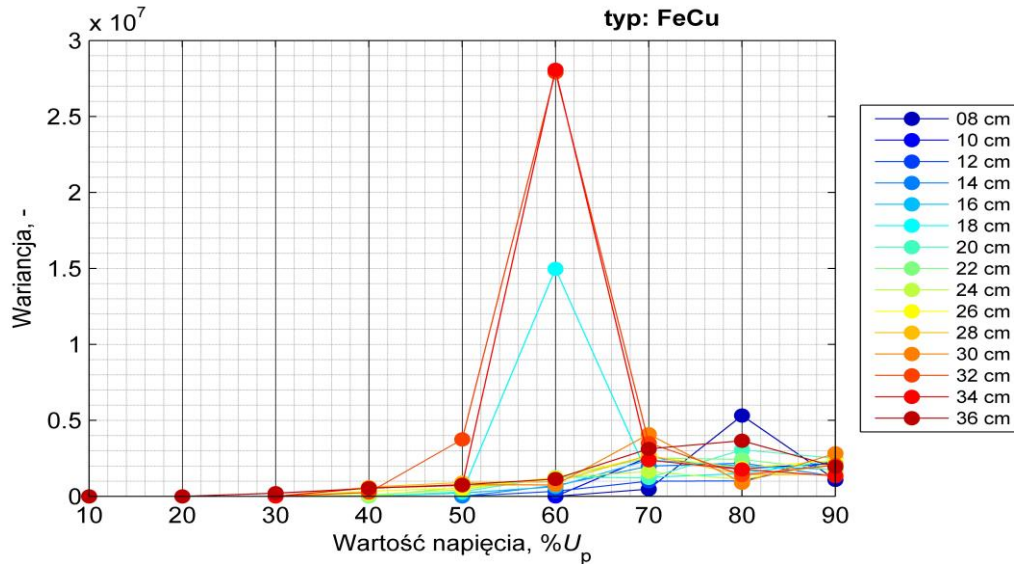
Rys. 8.13 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot w funkcji napięcia generacji, przy odległości $d=36\text{cm}$.

Na rys. 8.14 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii przy różnych odległościach między przewodami linii w układzie d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



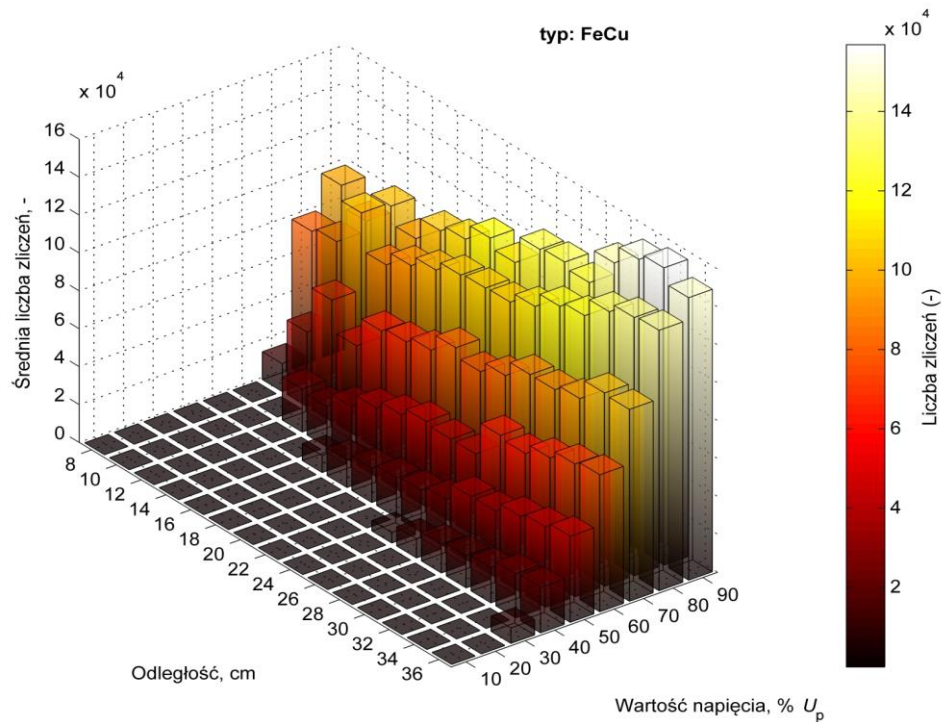
Rys. 8.14 Najwyższe wartości liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

Na rys. 8.15 przedstawiono zestawienie zbiorcze wariancji liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe przy różnych odległościach d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



Rys. 8.15 Wartości wariancji liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

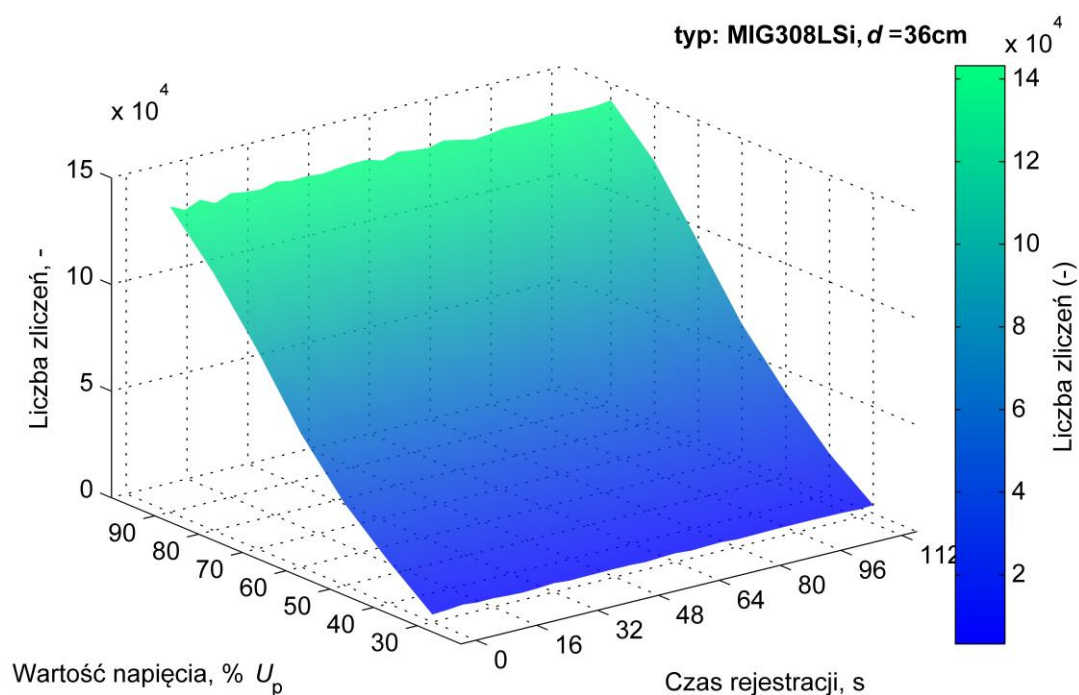
Na rys. 8.16 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych w funkcji napięcia generacji i odległości d .



Rys. 8.16 Wartości średnie liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

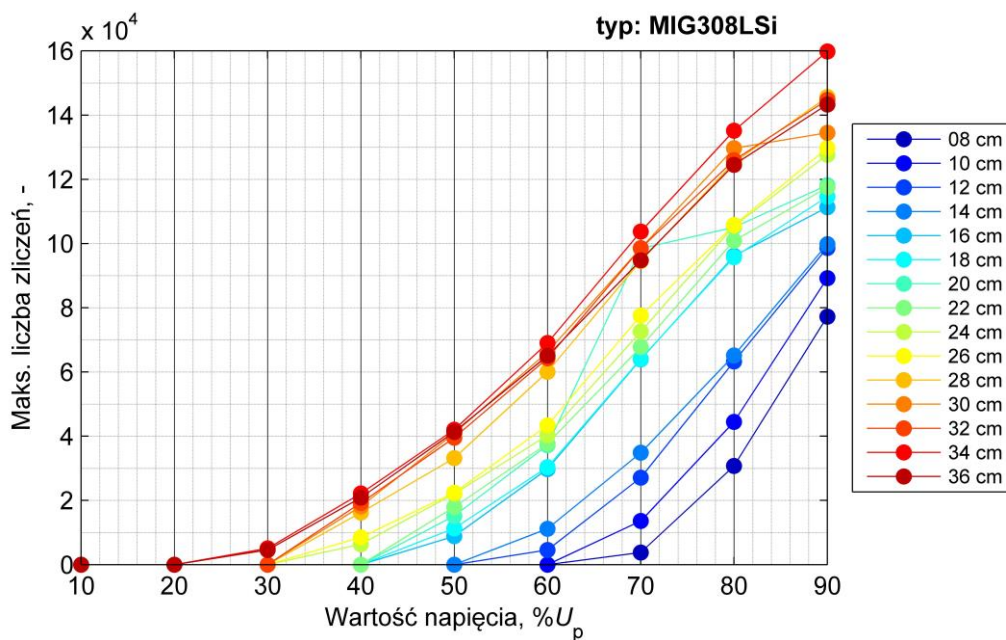
8.2.5. Wyniki pomiarów natężenia emisji świetlnej emitowanej przez ulot wokół linii wykonanej ze stali z domieszką chromu i niklu, typ MIG308LSi

Na rys. 8.17 przedstawiono wszystkie zarejestrowane wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej ze stali z domieszką chromu i niklu podczas pomiarów przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, w funkcji napięcia generacji ulotu.



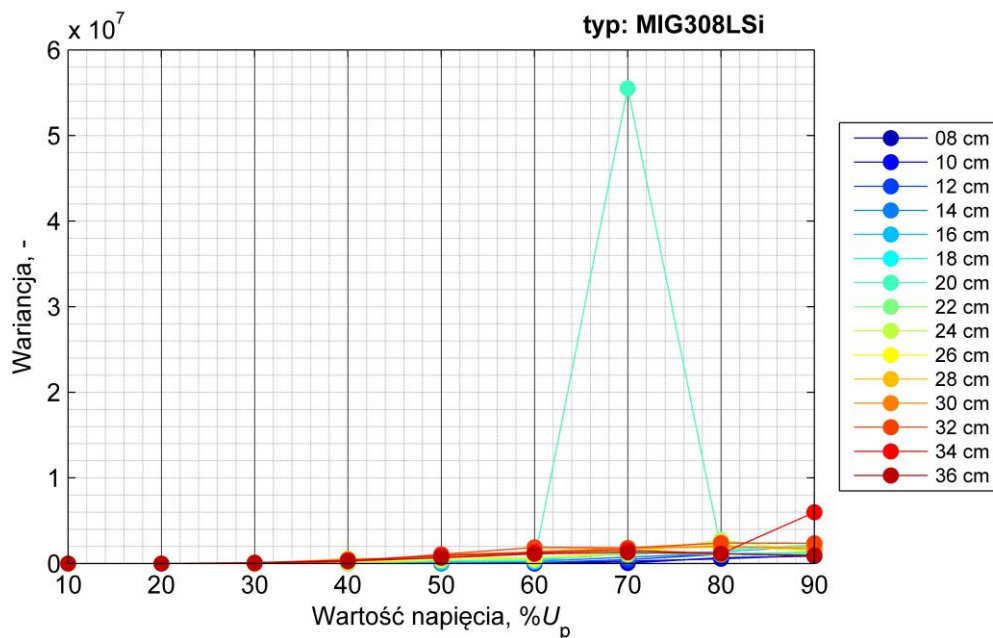
Rys. 8.17 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot w funkcji napięcia generacji, przy odległości $d=36$ cm.

Na rys. 8.18 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii przy różnych odległościach między przewodami linii w układzie d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



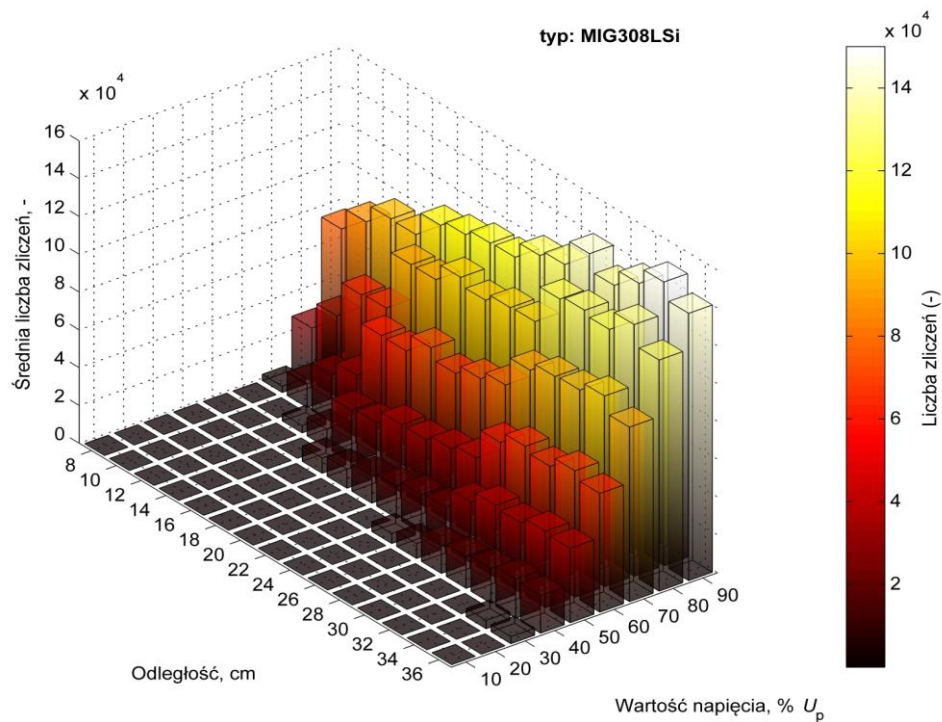
Rys. 8.18 Najwyższe wartości liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

Na rys. 8.19 przedstawiono zestawienie zbiorcze wariacji liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez wyładowania ulotowe przy różnych odległościach d , dla różnych wartości napięcia generacji ulotu.



Rys. 8.19 Wartości wariacji liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

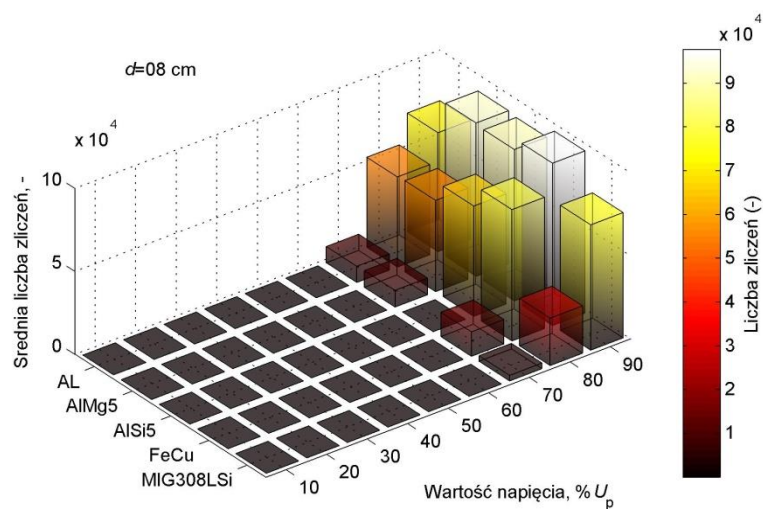
Na rys. 8.20 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych w funkcji napięcia generacji i odległości d .



Rys. 8.20 Wartości średnie liczby zliczeń w funkcji napięcia dla wszystkich przebadanych odległości d .

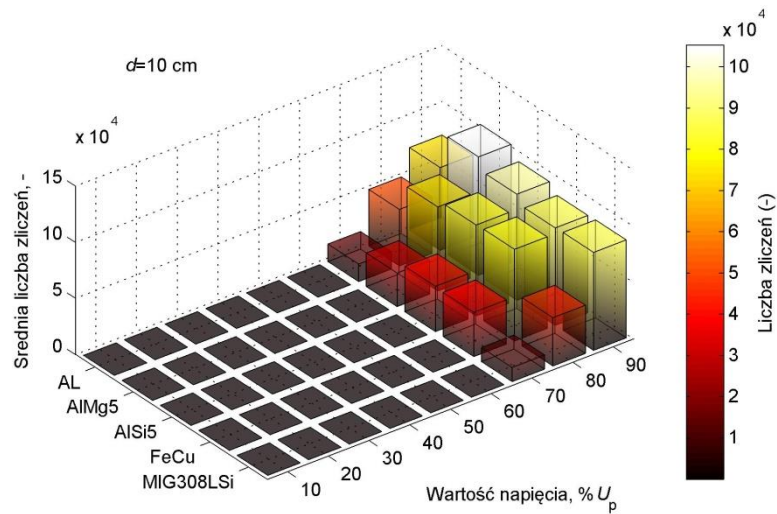
8.3. Zależność liczby zliczeń punktów emisyjnych od napięcia generacji dla różnych odległości między liniami wykonanymi z różnych materiałów

Na rys. 8.21 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=8\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



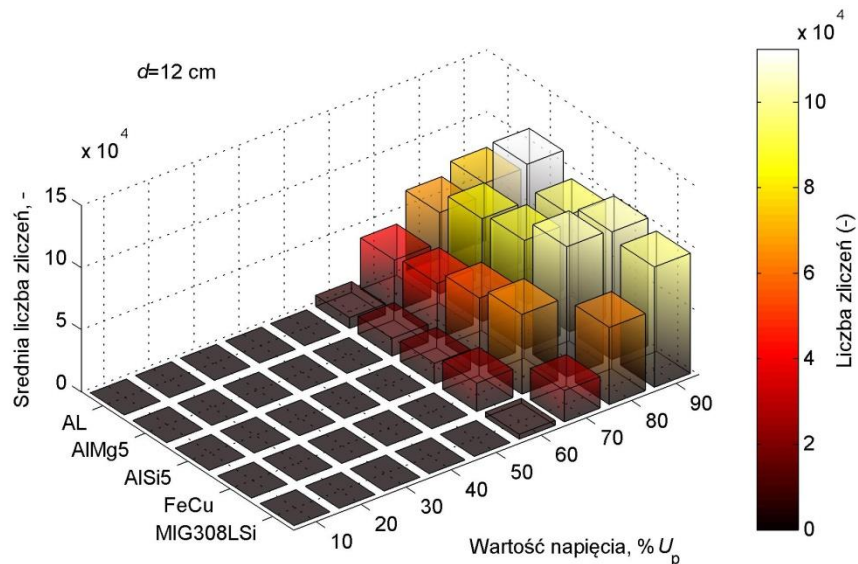
Rys. 8.21 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 8\text{cm}$.

Na rys. 8.22 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=10\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



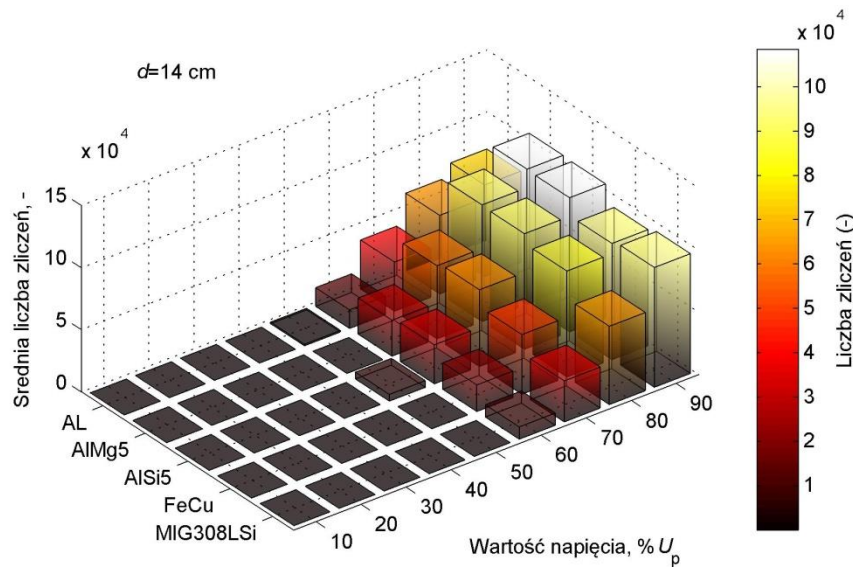
Rys. 8.22 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 10\text{cm}$.

Na rys. 8.23 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=12\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



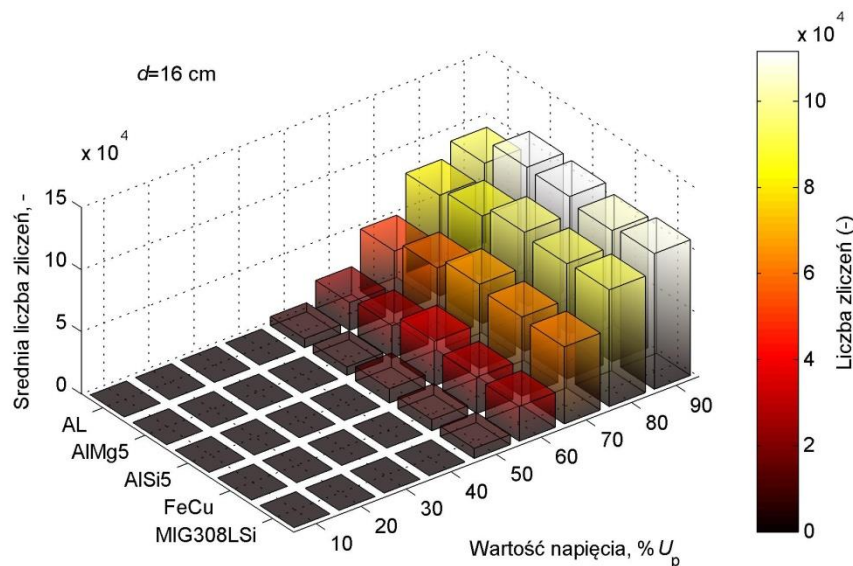
Rys. 8.23 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 12\text{cm}$.

Na rys. 8.24 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=14\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



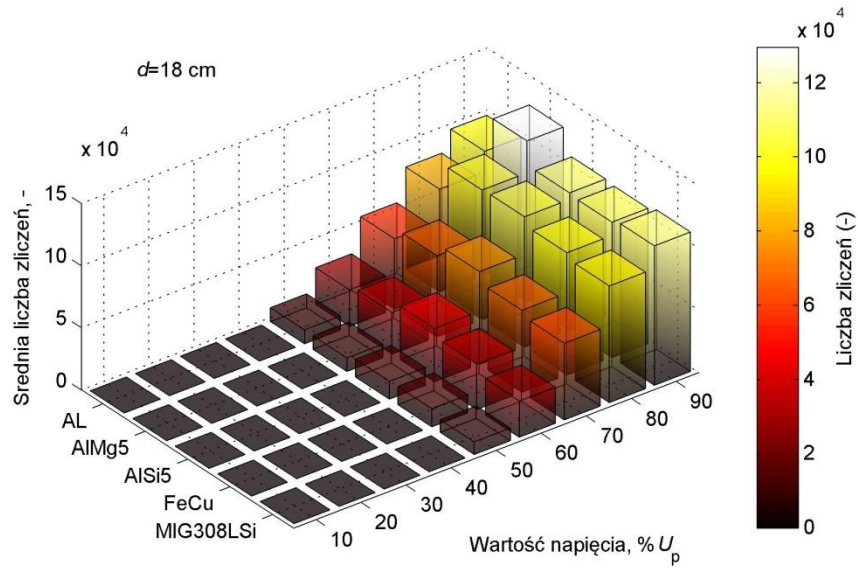
Rys. 8.24 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 10\text{cm}$.

Na rys. 8.25 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=16\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



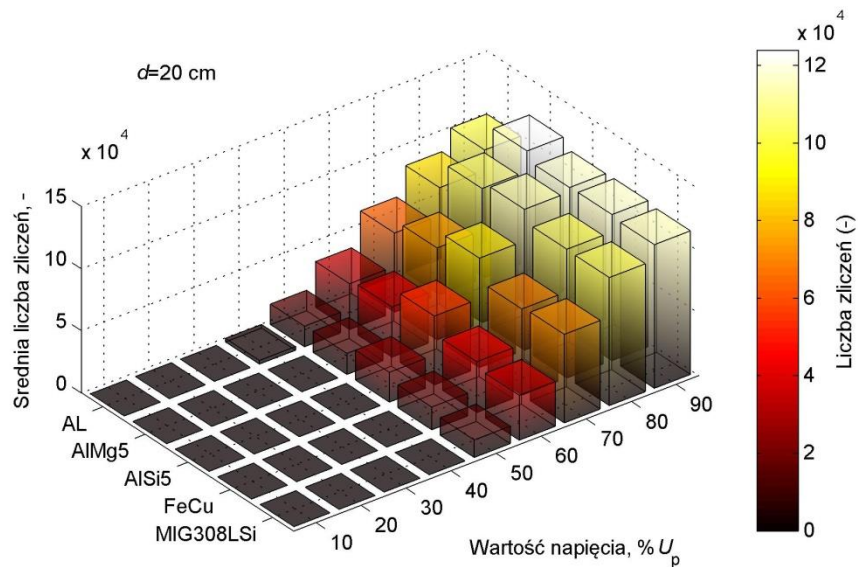
Rys. 8.25 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 16\text{cm}$.

Na rys. 8.26 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=18\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



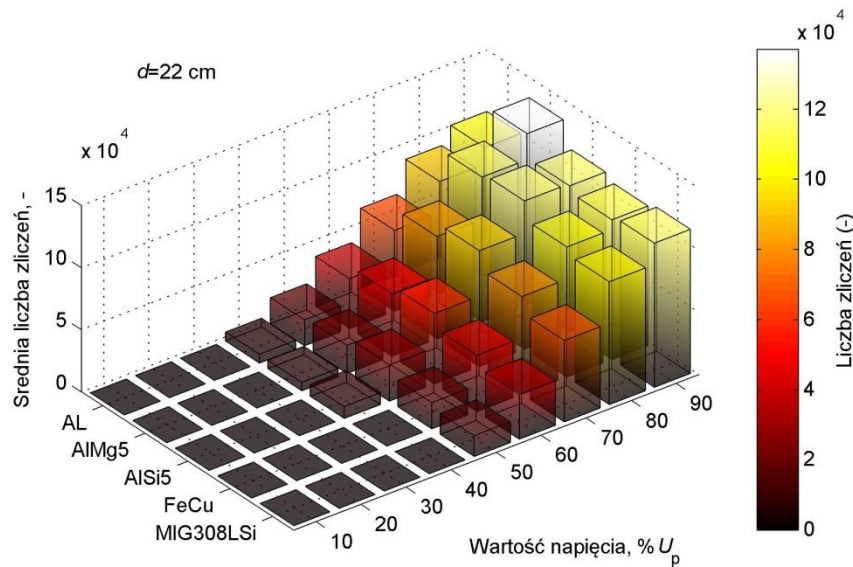
Rys. 8.26 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 18\text{cm}$.

Na rys. 8.27 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=20\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



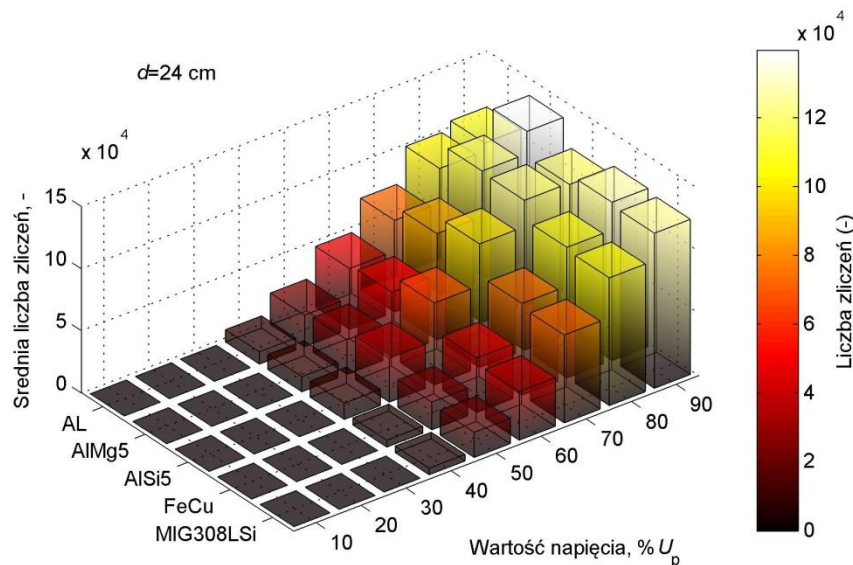
Rys. 8.27 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 20\text{cm}$.

Na rys. 8.28 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=22\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



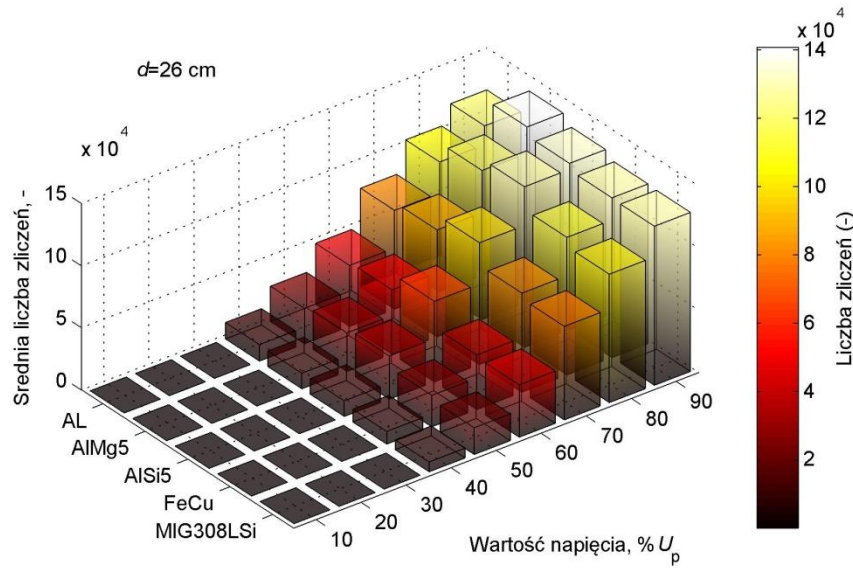
Rys. 8.28 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 22\text{cm}$.

Na rys. 8.29 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=24\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



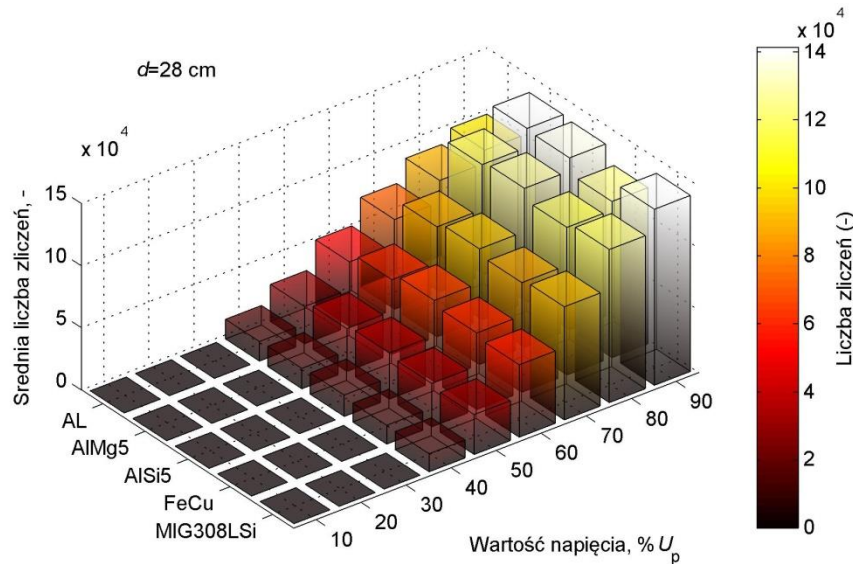
Rys. 8.29 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 24\text{cm}$.

Na rys. 8.30 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=26\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



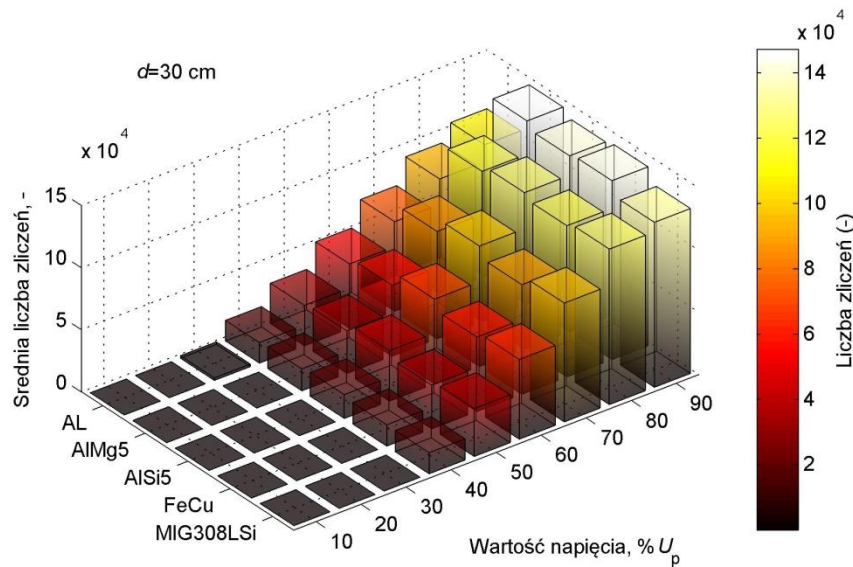
Rys. 8.30 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 26\text{cm}$.

Na rys. 8.31 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=28\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



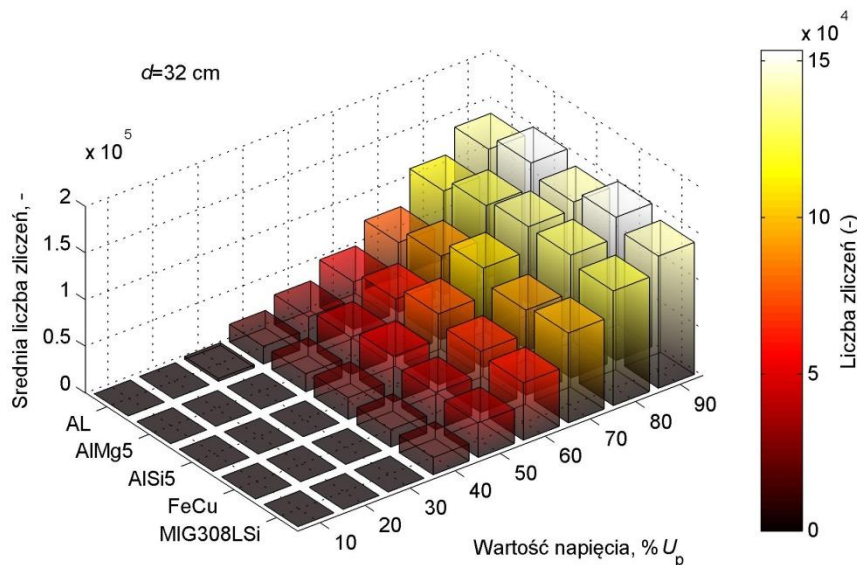
Rys. 8.31 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 28\text{cm}$.

Na rys. 8.32 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=30\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



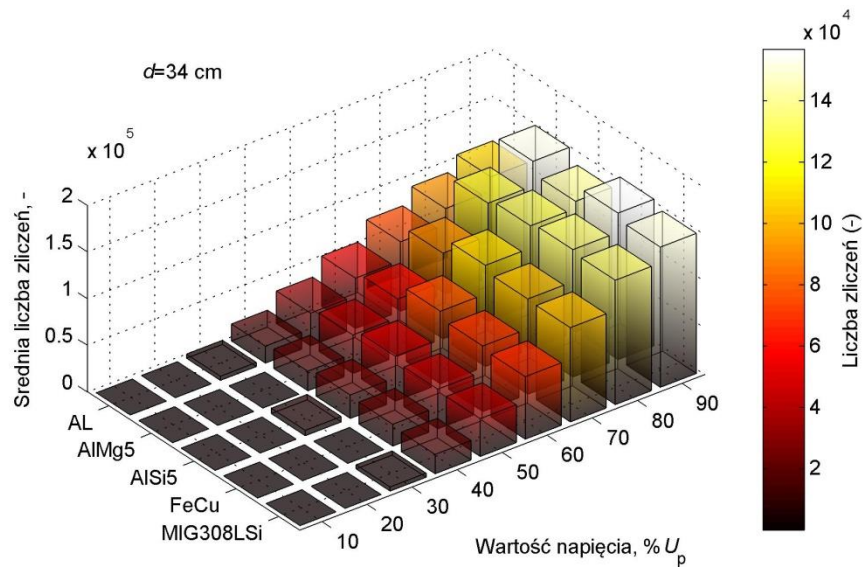
Rys. 8.32 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 30\text{cm}$.

Na rys. 8.33 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=32\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



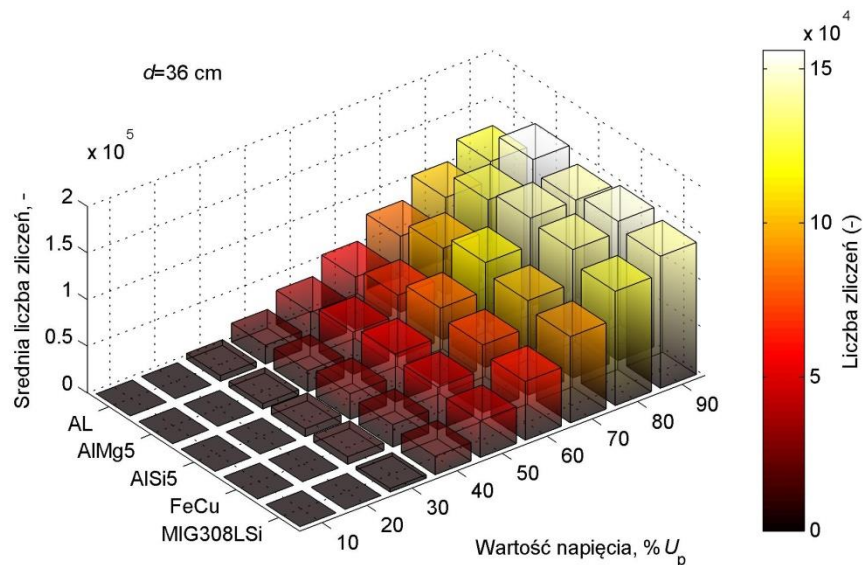
Rys. 8.33 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 30\text{cm}$.

Na rys. 8.34 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=34\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



Rys. 8.34 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 34\text{cm}$.

Na rys. 8.35 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, przy odległości $d=36\text{cm}$, w funkcji napięcia generacji ulotu.



Rys. 8.35 Średnia wartość liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot generowany wokół przewodów linii wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji przy odległości $d = 36\text{cm}$.

8.4. Interpretacja i podsumowanie wyników analiz sygnałów optycznych zarejestrowanych kamerą w zakresie UV

Na podstawie uzyskanych wyników i przeprowadzonych analiz dotyczących wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych wyładowań ulotowych sformułowano następujące wnioski:

- Dla każdej serii pomiarowej wykonano po 30 rejestracji liczby zliczeń punktów emisyjnych. Na podstawie zestawień zbiorczych zaobserwowano, że w przeciwieństwie do sygnałów rejestrowanych za pomocą spektrofotometru, w przypadku kamery UV wartości nie są podatne na wpływ stochastycznej natury występowania ulotu, na co wskazuje stabilny charakter zmian liczby zliczeń punktów emisyjnych emitowanych przez ulot w funkcji czasu.
- Dla wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych uzyskanych w każdej z serii pomiarowej obliczono średnie arytmetyczne, wartość najwyższą (maksymalną) i wariancję. Uzyskane wielkości przedstawiono w sposób zbiorczy w funkcji napięcia generacji ulotu i w funkcji odległości między przewodami linii (rys. 8.2 – 8.4, rys.8.6 – 8.8, rys.8.10 – 8.12, rys.8.14 – 8.16, rys.8.18 – 8.20). Na podstawie tych zestawień stwierdzono charakterystyczne monotoniczne zależności dla wszystkich badanych typów linii.
- Na podstawie analizy wykresów obrazujących zmienność wartości liczby zliczeń (wariancji) stwierdzono, że najwyższe poziomy zmienności liczby zliczeń zarejestrowano:
 - dla linii typu FeCu przy odległości d i napięciu generacji $\%U_p$ odpowiednio: (8cm, 80% U_p), (10cm, 70% U_p), (12cm, 90% U_p), (16, 70% U_p), (18, 60% U_p), (22, 70-80% U_p), (28, 70% U_p), (30, 70% U_p), (32, 60% U_p), (34, 60% U_p),
 - dla linii typu AlSi5 przy odległości d i napięciu generacji $\%U_p$ odpowiednio: (12cm, 80% U_p), (26, 90% U_p), (36, 60% U_p),
 - dla linii typu AL przy odległości d i napięciu generacji $\%U_p$ odpowiednio: (18cm, 60% U_p), (24, 50% U_p),
 - dla linii typu AlSi5 przy odległości d i napięciu generacji $\%U_p$ odpowiednio: (12cm, 80% U_p), (26, 90% U_p), (36, 60% U_p),
 - dla linii typu AlMg5 przy odległości d i napięciu generacji $\%U_p$ odpowiednio: (14cm, 90% U_p),
 - dla linii typu MIG308LSi przy odległości d i napięciu generacji $\%U_p$ odpowiednio: (20cm, 70% U_p)

- Wykonano analizę obrazującą zależności uśrednionych wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych rejestrowanych podczas pomiarów z wykorzystaniem badanych modeli linii, które przedstawiono w funkcji odległości d i napięcia generacji ulotu $\%U_p$. Na tej podstawie stwierdzono:
 - niezależnie od typu linii wzrost napięcia generacji ulotu powoduje znaczący wzrost liczby zliczeń punktów emisyjnych, który jest większy przy mniejszych odległościach między przewodami linii, a bardziej łagodny przy większych odległościach,
 - niezależnie od typu linii dla stałej wartości napięcia generacji ulotu wzrost odległości między przewodami linii powoduje nieznaczny wzrost liczby zliczeń punktów emisyjnych.
- Uśrednione wartości liczby zliczeń punktów emisyjnych przedstawiono w sposób zbiorczy dla wszystkich typów badanych linii na jednym wykresie i dokonano ich porównania uwzględniając zależność od napięcia $\%U_p$ dla różnych odległości między przewodami linii d (rys.8.21 – 8.35) Na podstawie tego typu analizy stwierdzono, że:
 - przy odległościach $d=16-20$ cm napięcie początkowe ulotu wynosiło $50\%U_p$, dla wszystkich typów linii.
 - przy odległościach $d=24-34$ cm ulot rejestrowano przy napięciu $40\%U_p$, dla wszystkich typów linii.
 - przy odległości $d=36$ cm ulot rejestrowano przy napięciu $30\%U_p$, dla wszystkich typów linii.
 - najczęściej najwyższą liczbę zliczeń rejestrowano na linii typu AlMg5. Dla pozostałych linii wykonanych z aluminium czystego lub domieszkowanego zarejestrowana intensywność ulotu była zbliżona do AlMg5.
 - najniższą intensywność wnz zarejestrowano dla linii MIG308LSi, dla tej linii zaobserwowano również mniejszą intensywność ulotu dla najniższych napięć – 20%, 30% napięcia początkowego ulotu.

9. Podsumowanie

Realizując badania opisane w niniejszej rozprawie wykonano serię pomiarów wykorzystując do tego celu przewody wykonane z różnych materiałów stosowanych w elektrotechnice: aluminium czyste i domieszkowane, stal chromowo-niklową, miedź.

Badając poszczególne układy rejestrowano wpływ poszczególnych parametrów układu – odległości między przewodami i wartości przyłożonego napięcia – na intensywność wnz oraz na widma optyczne emitowane podczas generowania wnz. Dla każdego układu w każdej konfiguracji (użyty materiał i ustalona odległość między przewodami) wyznaczono napięcie przebicia.

Wszystkie pomiary (widmo emitowanego sygnału optycznego oraz intensywność wnz) rejestrowane były jednocześnie za pomocą dwóch urządzeń – spektrofotometru i kamery UV. Szczegółowe wnioski z przeprowadzonych analiz przedstawiono w rozdziałach 7.5 i 8.4.

Wszystkie uzyskane dane zarejestrowane podczas prowadzenia badań zostały opracowane numerycznie, co umożliwiło znalezienie różnic i podobieństw między zachodzącymi zjawiskami.

Uzyskane podczas realizacji badań wyniki potwierdzają postawioną tezę pracy.

Oryginalnymi osiągnięciami pracy uzyskanymi przez Autora są:

- opracowanie i zbudowanie stanowiska badawczego do pomiarów zjawiska ulotu występującego w linii trójfazowej,
- opracowanie metodologii pomiarowej, wybór pięciu materiałów, z których wykonano przewody użyte do badań i określenie zakresu wykonywanych badań,
- wykonanie jednoczesnych pomiarów emitowanych widm w modelu linii trójfazowej za pomocą dwóch urządzeń:
 - spektrofotometru – rejestracja sygnałów w zakresie 200 nm do 1100 nm,
 - kamery UV – rejestracja sygnałów w zakresie 250 nm do 280 nm,
- wykonanie numerycznej analizy otrzymanych wyników,
- wykonanie oceny wpływu odległości i wartości przyłożonego napięcia na intensywność wnz i w konsekwencji na wartości optycznych deskryptorów charakteryzujących to zjawisko.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono różnice w intensywności występowania wnz wokół przewodów wykonanych z różnych materiałów. Największa intensywność wnz zmierzona kamerą jak i największa intensywność sygnału zmierzonego spektrofotometrem występuje dla linii aluminiowej, zarówno wykonanej z czystego aluminium

jak i z aluminium domieszkowanego magnezem i krzemem. Jest to najprawdopodobniej spowodowane intensywną korozją przewodów pod wpływem wnz i osadzaniem się na powierzchni przewodów silnie higroskopijnych tlenków aluminium. Korozja wpływa na gładkość powierzchni przewodów; pogarszając ją zwiększa intensywność występowania wnz, a to powoduje zwiększoną korozję. Można zatem określić w tym przypadku rodzaj dodatniego sprzężenia zwrotnego powodującego degradację linii elektroenergetycznej.

Rezultaty otrzymane podczas badań wykonanych w ramach niniejszej dysertacji mogą posłużyć do lepszej diagnostyki linii elektroenergetycznej a szczególnie wpływu korozji na intensywność wnz.

W ramach dalszych prac celowe wydaje się przebadanie wpływu gładkości przewodów na intensywność wnz, w tym określenie wpływu zabrudzeń, szczególnie dla starszych linii, na powstawanie, rozwój i intensywność wnz. W warunkach laboratoryjnych można określić które z czynników występujących podczas eksploatacji linii są dla niej szczególnie niebezpieczne. Badania takie można prowadzić również porównawczo dla różnych rzeczywistych przewodów stosowanych do budowy linii elektroenergetycznych. Możliwość wykorzystania optycznych technik wykrywania, rejestracji i analizy tych zjawisk zwiększy szanse na wypracowanie skutecznych metod wczesnego wykrywania defektów zagrażających bezawaryjnej pracy linii elektroenergetycznych.

Przedstawione w dysertacji wyniki pomiarów i analiz są wstępnym materiałem naukowym przeznaczonym do wykorzystania w pracach nad rozwiązaniami technicznymi mogącymi służyć do lepszej diagnostyki linii elektroenergetycznych.

LITERATURA

- [1] **ADLY A. R., EL SEHIEMY R. A., ABDELAZIZ A. Y., AYAD N. M. A.**, “Critical aspects on wavelet transforms based fault identification procedures in HV transmission line,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 2, pp. 508–517, 2016.
- [2] **AN F. W., HUA L. S., YOU W. C.**, “On-line partial discharge measurement for insulation condition monitoring of HV cables,” in *Proceedings - 2012 International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation, IMSNA 2012*, 2012, vol. 1, pp. 126–129.
- [3] **ANANE Z., BAYADI A.**, “Simulation of surge corona on three-phase transmission lines,” in *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 2012, pp. 1–5.
- [4] **APOSTOLOPOULOS C. A., KORRES G. N.**, “A novel algorithm for locating faults on transposed/untransposed transmission lines without utilizing line parameters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 4, pp. 2328–2338, 2010.
- [5] **ASCHENBRENNER D., KRANZ H. G., RUTGERS W. R., VAN DEN AARDWEG P.**, “On line PD measurements and diagnosis on power transformers,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 2, pp. 216–222, 2005.
- [6] **ASTINFESHAN S., GHOLAMI A., MOHAJERI M.**, “Analysis of corona effect on lightning performance of HV overhead transmission line using ATP/EMTP,” in *ICEE 2012 - 20th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2012, no. Icee20 12, pp. 485–488.
- [7] **BAJOREK J., MASLOWSKI G., ZIEMBA R.**, “Identification of corona parameters on overhead power lines in case of direct lightning strikes,” in *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2010*, 2010, pp. 69–72.
- [8] **BENDAOU A., TILMATINE A., MEDLES K., YOUNES M., BLEJAN O., DASCALESCU L.**, “Experimental study of corona discharge generated in a modified wireplate electrode configuration for electrostatic process applications,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 2, pp. 666–671, 2010.
- [9] **BIAN X., CHEN L., YU D., WANG L., GUAN Z.**, “Impact of surface roughness on corona discharge for 30-year operating conductors in 500-kV ac power transmission line,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 3, pp. 1693–1695, 2012.
- [10] **BIAN X., WANG L., GUAN Z., CAO J., YANG Y., WU X.**, “Experimental investigation on altitude correction factor of positive DC corona inception voltages of transmission lines based on the mobile corona cage,” in *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2010*, 2010, pp. 548–551.
- [11] **BO HU, LI-XIN MA, SHU-JUAN YUAN, BAI YANG**, “New corona ultraviolet detection system and fault location method,” in *2012 China International Conference on Electricity Distribution*, 2012, no. CiCED, pp. 1–4.
- [12] **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.
- [13] **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.

- [14] **BOCZAR T., FRĄCZ P., URBANIEC I.**, Detection of partial discharges occurring on HV cylindrical insulator made of porcelain using the spectrophotometry method, *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation*, 9th International Conference NEET 2015, Zakopane, Poland, June 23 – 26, 2015, s. 106.
- [15] **BOCZAR T., FRĄCZ P., ZMARZŁY D.**, *Widma optyczne wyładowań elektrycznych*”, *Zeszyt Specjalny Przeglądu Elektrotechnicznego*, VII Ogólnopolskie Symp. Inżynieria Wysokich Napięć IW, Poznań, 2004, str. 19-22.
- [16] **BOCZAR T., ZMARZŁY D., FRĄCZ P.**, *Możliwości zastosowania spektrofotometrii optycznej w diagnostyce układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych*, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 10, 2007, str. 36-41.
- [17] **BRAHAMI M., GOURBI A., TILMATINE A., DASCALESCU L.**, “Numerical analysis of the induced corona vibrations on high-voltage transmission lines affected by rainfall,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 2, pp. 617–624, 2011.
- [18] **CHENG Y., LI C., HUANG X.**, “Study of Corona Discharge Pattern on High Voltage Transmission Lines for Inspecting,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 945–952, 2008.
- [19] **CHOI Y. S., YUN J. H., LEE K. S.**, “On-line insulation diagnostic system and off-line PD monitoring with HVAC testing,” in *Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2008*, 2007, vol. 2, pp. 85–88.
- [20] **COSTA E. C. M., KUROKAWA S., FILHO J. P.**, “Corona discharge model for transmission lines by lumped elements,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 9, no. 1, pp. 70–75, 2011.
- [21] **DAI M., YU Z., GAO Z., LI S., ZENG R., ZHANG B., LI M., LI R., LIU L., GAO C.**, “Corona onset characteristics of grading rings on +/- 800kV UHVDC transmission line,” in *Proceedings - 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering, ISEEE 2014*, 2014, vol. 2, pp. 800–804.
- [22] **DANUTA D., JASTRZEBSKA E., AND KURBIEL W.**, “Awaryje Linii Elektroenergetycznych Wywołane Obładowaniem” in *Konferencja Naukowo-Techniczna Awaryje Budowlane*, 2013, pp. 477–484.
- [23] **DASH P. K., SAMANTARAY S. R., PANDA G.**, “Fault Classification and Section Identification of an Advanced Series-Compensated Transmission Line Using Support Vector Machine,” *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 22, no. 1, pp. 67–73, 2007.
- [24] **DE FREITAS M. A., KUROKAWA S., FILHO J. P.**, “Corona effect in frequency dependent transmission line models,” in *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, T and D-LA*, 2008, pp. 1–7.
- [25] **DE MORAIS PEREIRA C. E., ZANETTA L. C.**, “Fault location in multitapped transmission lines using unsynchronized data and superposition theorem,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 4, pp. 2081–2089, 2011.
- [26] **DE MORAIS PEREIRA C. E., ZANETTA L. C.**, “Optimization algorithm for fault location in transmission lines considering current transformers saturation,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2 I, pp. 603–608, 2005.
- [27] **DIB D., DAAS A.**, “Influence of atmospheric conditions on the corona effect in HV power systems,” in *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and*

- Exposition, PEMC 2014, 2014, pp. 628–634.
- [28] **DOWLATDAD F., ABOUEI J., SAADAT R., ANPALAGAN A.**, “A Markov-Middleton model for Corona noise in WSN transmission line monitoring,” in 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2015, pp. 440–445.
- [29] **EVANS J., THOMAS D., GREEDY S.**, “A corona discharge model using the transmission-line modelling method,” in 9th IET International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM 2014), 2014, pp. 1–2.
- [30] **EVANS J.L., THOMAS D. W. P., GREEDY S.**, “Modeling the influence of Corona Discharge on High-Voltage Surges Propagating along Transmission-Lines using TLM,” in IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015, pp. 981–986.
- [31] **FLISOWSKI Z.**, Technika wysokich napięć. Warszawa: WNT, 2005.
- [32] **FLORKOWSKA B.**, Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Kraków: UWND AGH, 2003.
- [33] **FLORKOWSKA B., FLORKOWSKI M., ROEHRICH J., ZYDRON P.**, “Partial discharge mechanism in non-homogenous electric field at higher pressure,” Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE, no. April 2010, pp. 326–330, 2008.
- [34] **FORTES M. Z., FERREIRA V. H., ZANGHI R.**, “Fault Diagnosis in Transmission Lines: Trends and Main Research Areas,” IEEE Lat. Am. Trans., vol. 13, no. 10, pp. 3324–3332, 2015.
- [35] **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.
- [36] **FRĄCZ P.**, Analiza powtarzalności pomiarów sygnałów optycznych emitowanych przez wyładowania elektryczne w izolacji powietrznej, Przegląd Elektrotechniczny. Nr 7, 2010, str. 128-130.
- [37] **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.
- [38] **FRĄCZ P.**, Badanie promieniowania ultrafioletowego generowanego przez wyładowania niezupełne powierzchniowe w powietrzu, Pomiary Automatyka Robotyka, Nr 12, 2010, str. 90-92.
- [39] **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.
- [40] **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.
- [41] **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.

- [42] **FRĄCZ P.**, Założenia systemu eksperckiego pomiaru wyładowań niepełnych przy zastosowaniu metody spektrofotometrii optycznej, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 55, Nr 1, 2009, str. 50-53
- [43] **FRĄCZ P.**, Wykorzystanie optycznych sygnałów emitowanych przez wyładowania elektryczne w diagnostyce izolatorów. *Studia i Monografie*, nr 285, Of. Wyd. Pol. Op., Opole, 2011.
- [44] **FRĄCZ P., URBANIEC I., FOLTYS J.**, Comparison of Two Methods for Detection of UV Signals Emitted by PD on HV Insulator Made of Porcelain, *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation*, 9th International Conference NEET 2015, Zakopane, Poland, June 23 – 26, 2015, s. 107.
- [45] **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.
- [46] **GIUSSANI R., COTTON I., SLOAN R.**, “Detection of corona with RF methods and spectra analysis,” in *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2012, pp. 132–136.
- [47] **GOMES A. D. S., COSTA M. A., GIOVANI T., DE FARIA A., CAMINHAS W. M.**, “Detection and Classification of Faults in Power Transmission Lines Using Functional Analysis and Computational Intelligence,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1402–1413, 2013.
- [48] **GROBICKI J., GERMATA M.**, *Przewody i kable elektroenergetyczne*. Warszawa: WNT, 2000.
- [49] **Group CIGRE Working**, “Interferences produced by corona effect of electric systems,” 1974.
- [50] **Group CIGRE Working**, “Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines,” REF 063, 1991.
- [51] **HASSANVAND A., ILLIAS H. A., MOKHLIS H., BAKAR A. H. A.**, “Effects of corona ring dimensions on the electric field distribution on 132 kV glass insulator,” in *Proceedings of the IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO*, 2014, no. March, pp. 248–251.
- [52] **HUANG D., ZHENG Z., HUANG Z., XIE X., RUAN J., HUO F.**, “Study on parameters design and corona characteristics test equivalent of grading rings for 1000kV UHV AC compact transmission line,” in *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, 2013, pp. 638–642.
- [53] **HUANG Q., SHAO L., LI N.**, “Dynamic detection of transmission line outages using Hidden Markov Models,” in *Proceedings of the American Control Conference*, 2015, no. 3, pp. 5050–5055.
- [54] **IDARRAGA G., GUILLEN D., RAMIREZ J. M., ZAMORA A., PATERNINA M. R. A.**, “Detection and classification of faults in transmission lines using the maximum wavelet singular value and Euclidean norm,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 15, pp. 2294–2302, 2015.
- [55] **INOUE A.**, “Propagation Analysis of Overvoltage Surges with Corona Based upon Charge Versus Voltage Curve,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-5, no. 3, pp. 41–42, 1985.

- [56] **IZYKOWSKI J., MEMBER S., ROSOŁOWSKI E.**, “Postfault Analysis of Operation of Distance Protective Relays of Power Transmission Lines,” in *IEEE Russia Power Tech*, 2005, vol. 22, no. 1, pp. 1–7.
- [57] **KLUETER T., WULFF J., JENAU F., WIENOLD D.**, “Evaluation of Surface- and Corona Discharges at DC Voltage,” in *13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2013, pp. 255–259.
- [58] **KOCHEL M., KUJSZCZYK S., MARZECKI J., NIESTĘPSKI S., PASTERNAKIEWICZ J., WIŚNIEWSKI T.**, *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze Tom 2*. Warszawa: PWN, 1991.
- [59] **LESSA L. S., PRADO A. J., KUROKAWA S., FILHO J. P., BOVOLATO L. F.**, “Application of pi circuits for simulation of corona effect in transmission lines,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, no. 4, pp. 1–7, 2012.
- [60] **LI J. M., ZHANG Y.**, “Improvement on the Corona Model of Ultra High Voltage Alternating Current Transmission Lines,” in *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, 2013, pp. 69–75.
- [61] **LI J., PENG Z.**, “Study on Electric Field Distribution of Cage-type Rigid Jumper for 1000kV AC Ultra High Voltage Transmission Lines,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2009, no. 4, pp. 76–80.
- [62] **LIAO Y., KEZUNOVIC M.**, “Optimal estimate of transmission line fault location considering measurement errors,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1335–1341, 2007.
- [63] **LIU Y. P., BIN WANG H., CHEN W. J., YANG Y. J., JIAN T.**, “Test study on corona onset voltage of UHV transmission lines based on UV detection,” in *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2008*, 2008, pp. 387–390.
- [64] **LIU Z., HAN Z., ZHANG Y., ZHANG Q.**, “Multiwavelet packet entropy and its application in transmission line fault recognition and classification,” *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, vol. 25, no. 11, pp. 2043–2052, 2014.
- [65] **LU T., ZOU Y., RAO H., WANG Q.**, “Analysis of electromagnetic radiation from HVAC test transmission line due to corona discharge,” in *Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, CEFC 2010*, 2010, vol. 7, no. 1, p. 7062.
- [66] **MA M., ZHAO Y., GUAN Z., WANG L.**, “The influence of contaminations on HVDC conductor corona characteristics,” in *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, 2007, pp. 537–541.
- [67] **MARUVADA P. S.**, “Influence of ambient electric field on the corona performance of HVdc transmission lines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 2, pp. 691–698, 2014.
- [68] **MOHANTA D. K., GOPAKUMAR P., REDDY M. J. B.**, “Transmission line fault detection and localisation methodology using PMU measurements,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 11, pp. 1033–1042, 2015.
- [69] **MORAVEJ Z., PAZOKI M., KHEDERZADEH M.**, “New Pattern-Recognition Method for Fault Analysis in Transmission Line With UPFC,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 3, pp. 1–1, 2014.

- [70] **MOYO N. M., IJUMBA N. M., BRITTEN A. C.**, “Investigating contributing factors to HVDC corona noise,” in Proceedings of the Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa, 2005, no. July, pp. 428–432.
- [71] **NAYAK S. K., THOMAS M. J.**, “An integro-differential equation technique for the computation of radiated EMI due to corona on HV power transmission lines,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 20, no. 1, pp. 488–493, 2005.
- [72] **NOORI M. R., SHAHRTASH S. M.**, “Combined Fault Detector and Faulted Phase Selector for Transmission Lines Based on Adaptive Cumulative Sum Method,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 28, no. 3, pp. 1779–1787, 2013.
- [73] **PEEK F. W.**, Dielectric phenomena in high voltage engineering. Mc Graw-Hill, 1929.
- [74] **POKRYVAILO A., YANKELEVICH Y., NISSIM N., BAKSHT R., ASHKENAZY J.**, “Development of Short Pulsed Corona on Two- Wire Transmission Line,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 34, no. 1, pp. 104–114, 2006.
- [75] **PSE-Operator**, “Informacje o systemie,” 2016. [Online]. Available: <http://www.pse.pl/index.php?dzid=79&did=22>.
- [76] **PSE-Operator**, “Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka,” Warszawa, 2009.
- [77] **PSE**, http://www.pse.pl/uploads/obrazki/plan_sieci_elektroenergetycznej_najwyzszych_napiec.jpg, dostęp kwiecień 2016.
- [78] **RAJARAMAN P., SUNDARAVARADAN N. A., MEYUR R., JAYA BHARATHA REDDY M., MOHANTA D. K.**, “Fault classification in transmission lines using wavelet multiresolution analysis,” IEEE Potentials, pp. 38–44, 2016.
- [79] **ROMERO-TRONCOSO R. J., CABAL-YEPEZ E., GARCIA-PEREZ A., OSORNIO-RIOS R. A., ALVAREZ-SALAS R., GRANADOS-LIEBERMAN D.**, “Reconfigurable instrument for power quality monitoring in 3-phase power systems,” in 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, 2011, pp. 186–191.
- [80] **SHEN M., WU J., YIN Y.**, “Experimental Investigating on on-line monitoring of insulation system of power transformers,” in Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, 2013, pp. 327–330.
- [81] **SHUWEI W., XUESONG Z., XINYANG G., LAN C., XINGMING B., WENJUN Y., MACALPINE M., LIMING W., ZHICHENG G.**, “The effect of Applied-voltage on photon-number of corona discharge on transmission lines defect,” in 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2013, pp. 311–314.
- [82] **SILVA K. M., SOUZA B. A., BRITO N. S. D.**, “Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 21, no. 4, pp. 2058–2063, 2006.
- [83] **SIMA W., FAN S., YANG Q., YUAN T., WANG Q.**, “Modelling of the inhibition effect of thin-wire ultra-corona on upward leader and its application on lightning protection in high-voltage transmission lines,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 8, no. 5, pp. 935–944, 2014.
- [84] **SKUBIS J., FRĄCZ P.**, Prognozy wykorzystania metody optycznej diagnostyki spektralnej do detekcji i pomiaru różnego typu wylądowań elektrycznych. Konf. n-t, Transformatory w Eksploatacji, Sieniawa, 2002, str. 159-164.

- [85] **STRANGES M. K. W., UL HAQ S., DUNN D. G.**, “Black-out test versus UV camera for corona inspection of HV motor stator endwindings,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 5, pp. 3135–3140, 2014.
- [86] **SUGIMOTO T., ISHII H., HIGASHIYAMA Y.**, “Corona charging and current measurement using Phi-type corona electrodes,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 3, pp. 1175–1180, 2010.
- [87] **SUI D., KANG J., XUEBIN L., FUCUN H., LUO B.**, “Modeling of Corona at Ultra High Voltage Transmission Lines,” in *3rd International Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Systems*, 2015, pp. 700–706.
- [88] **SUN Z., ZHAO X., LI J., LI Y.**, “Measurement, diagnostics and monitoring of partial discharges on high-voltage equipment on-line and off-line,” in *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009*, 2009, pp. 1521–1526.
- [89] **SWETAPADMA A., YADAV A.**, “Improved fault location algorithm for multi-location faults, transforming faults and shunt faults in thyristor controlled series capacitor compensated transmission line,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 13, pp. 1597–1607, 2015.
- [90] **TEJADA C., GOMEZ P., ESCAMILLA J. C.**, “Computation of radio interference levels in high voltage transmission lines with corona,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 7, no. 1, pp. 54–61, 2009.
- [91] **THANG T. H., BABA Y., NAGAOKA N., AMETANI A., TAKAMI J., OKABE S., RAKOV V. A.**, “Modeling of corona discharge on a transmission line conductor struck by lightning for FDTD calculations,” in *2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, APEMC 2010*, 2010, pp. 1309–1312.
- [92] **TSONIFF B., BURGER A. A.**, “Influence of the corona discharge on DC current,” in *IEEE Power and Energy Society Conference and Exposition in Africa: Intelligent Grid Integration of Renewable Energy Resources, PowerAfrica*, 2012, pp. 1–4.
- [93] **URBAN R. G., READER H. C., HOLTZHAUSEN J. P.**, “Small corona cage for wideband HVac radio noise studies: Rationale and critical design,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 1150–1157, 2008.
- [94] **WANG P., ZHANG G.**, “The measurement method for corona discharge current under high-voltage environment,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 8, pp. 1786–1790, 2008.
- [95] **WANG Q., KUNDUR D., YUAN H., LIU Y., LU J., MA Z.**, “Noise Suppression of Corona Current Measurement From HVdc Transmission Lines,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 2, pp. 264–275, 2016.
- [96] **WANG W., LI C., LIU Y., LUO B., LI X., JIANG Y., AN B., WANG Y.**, “Study of full scale UHV DC transmission line corona performance in corona cage,” in *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2008, pp. 63–65.
- [97] **WASIAK I.**, *Elektroenergetyka w Zarysie Przesył i rozdział energii elektrycznej*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2010.
- [98] **WEI L., GUO W., WEN F., LEDWICH G., LIAO Z., XIN J.**, “Waveform matching approach for fault diagnosis of a high-voltage transmission line employing harmony search algorithm,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, no. April, p. 801, 2010.

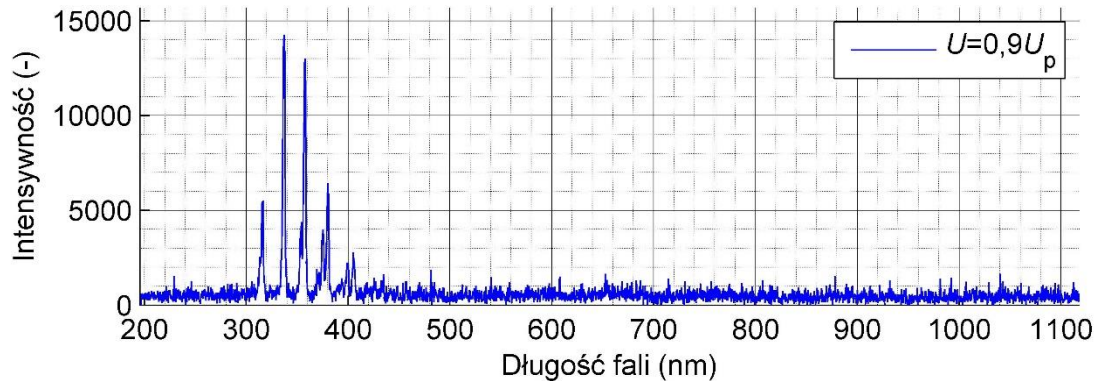
- [99] **XIAOFENG H., SHANGHE L., MING W., LEI W.**, “Measurement and analysis of Electromagnetic Fields Radiated by Corona Discharge Introduction current,” in International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2007, pp. 31–34.
- [100] **XIAOYU L.**, “Experiment Study on Radiation Characteristics of Corona Discharge on Hardware,” in International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC, 2005, vol. 3, pp. 840–843.
- [101] **YADAV A., SWETAPADMA A.**, “Enhancing the performance of transmission line directional relaying, fault classification and fault location schemes using fuzzy inference system,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 9, no. 6, pp. 580–591, 2015.
- [102] **YANG P., CHEN S., HE J.**, “Lightning impulse corona characteristic of 1000-kv uhv transmission lines and its influences on lightning overvoltage analysis results,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 28, no. 4, pp. 2518–2525, 2013.
- [103] **YONG YANG, JIAYU LU, YINZHAO LEI**, “A Calculation Method for the Electric Field Under Double-Circuit HVDC Transmission Lines,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 23, no. 4, pp. 1736–1742, 2008.
- [104] **YU D., FARZANEH M., ZHANG J., SHU L., SIMA W., SUN C.**, “Properties of corona discharge under positive DC voltage at low atmospheric pressure,” in Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, 2006, pp. 393–396.
- [105] **YUAN H., YANG Q., LIU Y., LU J., AKHTAR S. A.**, “Development and application of high-frequency sensor for corona current measurement under ultra high-voltage direct-current environment,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 61, no. 4, pp. 1064–1071, 2012.
- [106] **ZANGENEH A., GHOLAMI A., ZAMANI V.**, “A new method for calculation of corona inception voltage in stranded conductors of overhead transmission lines,” in First International Power and Energy Conference, (PECon 2006) Proceedings, 2006, pp. 571–574.
- [107] **ZHANG Q., SORINE M., MEHDI A.**, “Inverse Scattering for Soft Fault Diagnosis in Electric Transmission Lines,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 59, no. 1, pp. 141 – 148, 2011.
- [108] **ZHENG Y. Z. Y., YU J. Y. J., WANG G. W. G.**, “The power frequency electrical field on EHV AC transmission lines under corona discharge conditions,” in 2008 World Automation Congress, 2008, pp. 1–5.
- [109] **ZHOU W., LI H., YI X., TU J., YU J.**, “A criterion for UV detection of AC corona inception in a rod-plane air gap,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 18, no. 1, pp. 232–237, 2011.

**Wyniki pomiarów uzyskanych metodą spektrofotometrii
i ich interpretacja**

- 1. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, typ AlMg5**
- 2. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu, typ AlSi5**
- 3. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, typ FeCu**
- 4. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, typ MIG308LSi**

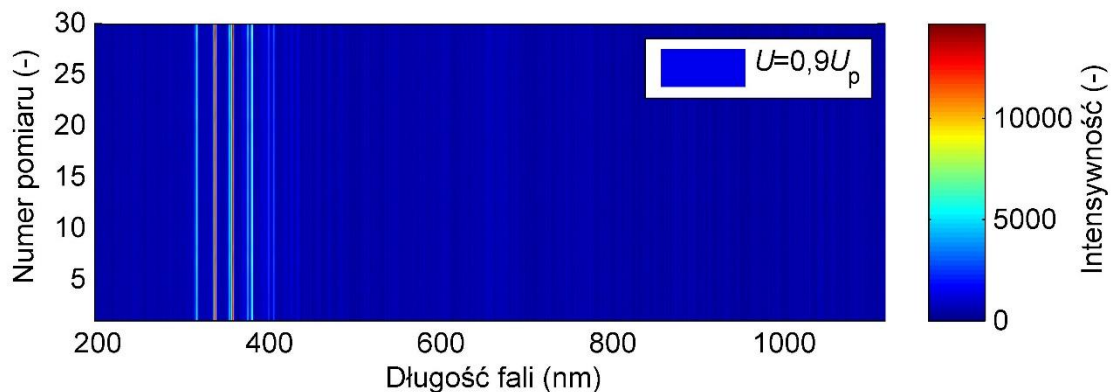
1. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, typ AlMg5

Na rys. 1.1 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu podczas pomiarów, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



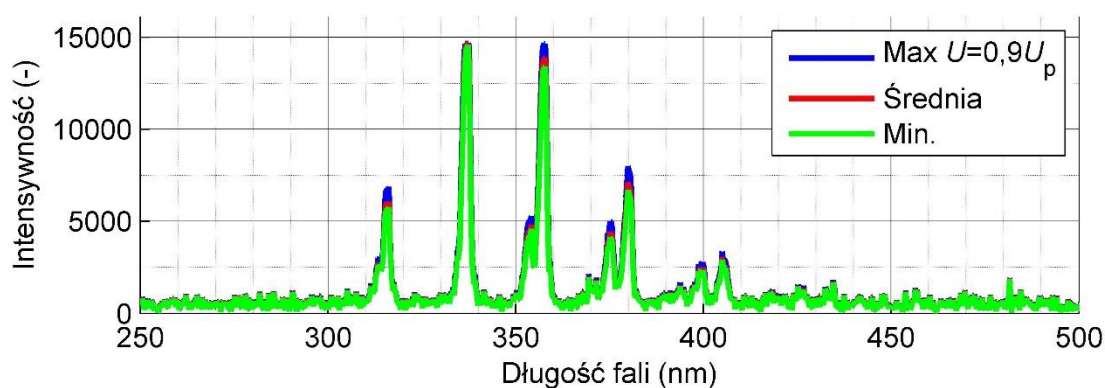
Rys. 1.1 Intensywność i struktura widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej magnezem aluminiowej linii przy napięciu $0,9U_p = 112,2$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 1.2 przedstawiono zestawienie zbiorcze wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$, dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów, czyli dla 30 pomiarów.



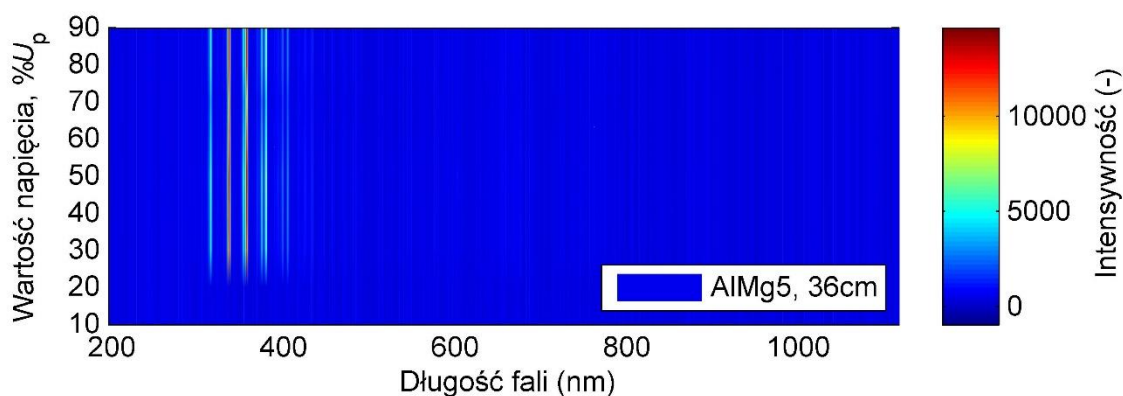
Rys. 1.2 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej magnezem aluminiowej linii przy napięciu $0,9U_p = 112,2$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 1.3 przedstawiono podstawowe statystyki uzyskane z 30 pomiarów: wartość średniej arytmetycznej, maksymalną i minimalną, obliczone dla intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



Rys. 1.3 Wartość maksymalna (Max), średnia i minimalna (Min.) intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej magnezem aluminiowej linii przy napięciu $0,9U_p = 112,2$ kV i odległości $d = 36$ cm.

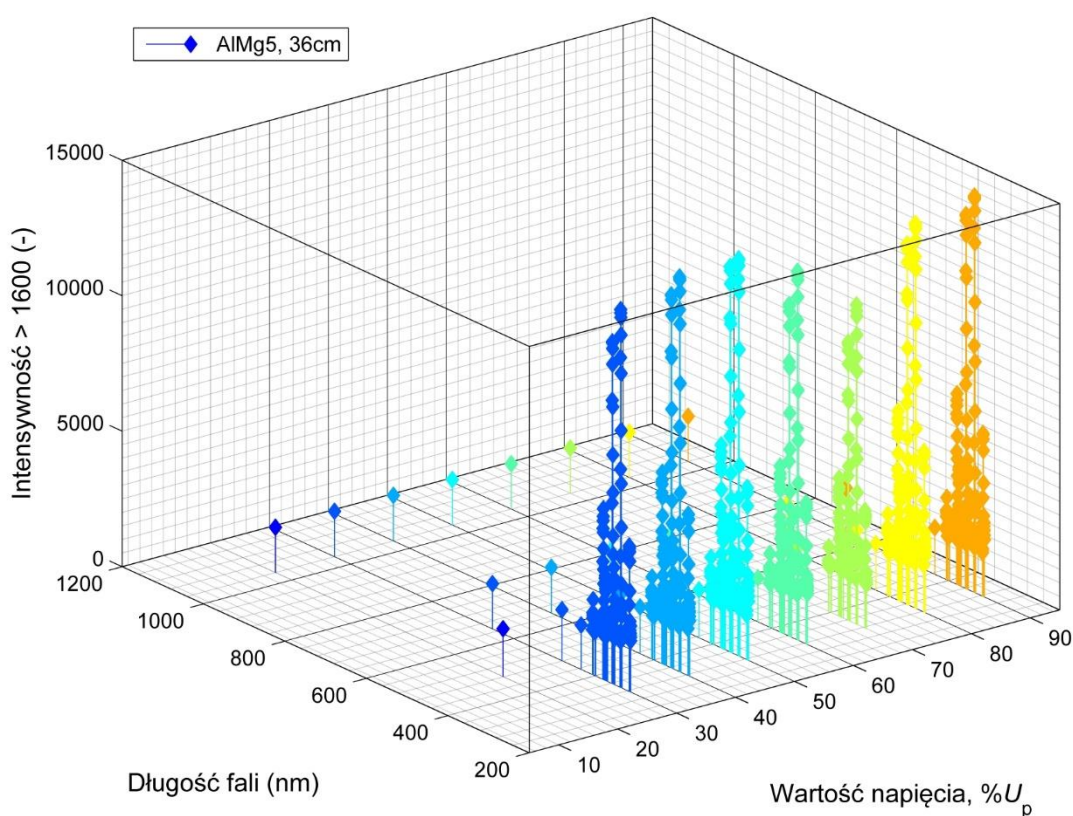
Na rys. 1.4 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych ze wszystkich pomiarów wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wszystkich analizowanych wartości napięcia generacji ulotu.



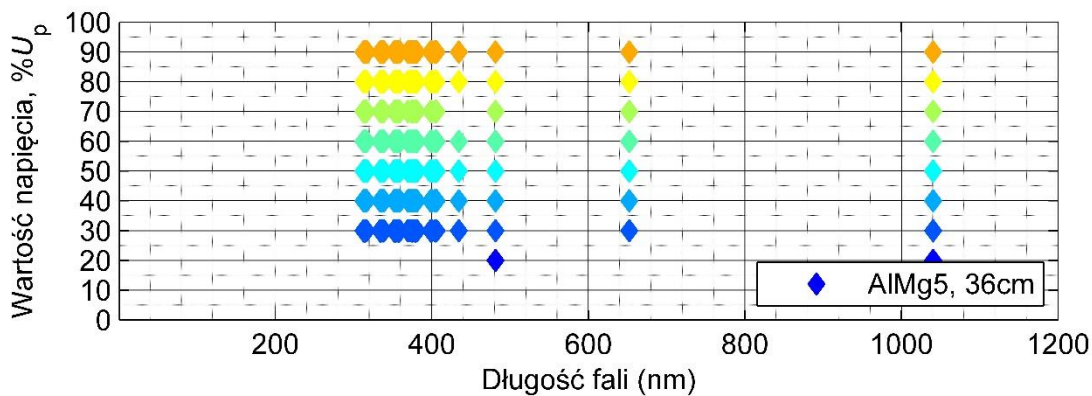
Rys. 1.4 Zależność uśrednionych wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej magnezem aluminiowej linii przy odległości $d = 36$ cm od napięcia generacji ulotu.

W celu analizy dominujących składowych widma na rys. 1.5 przedstawiono zbiorcze zestawienie intensywności przekraczających wartość 1600 ($I > 1600$) uzyskanych podczas pomiarów widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm w funkcji napięcia generacji ulotu.

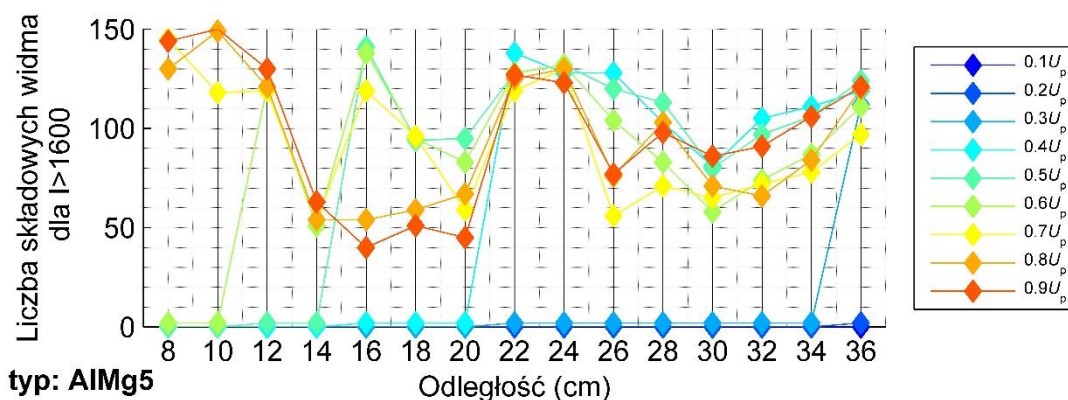
Na rys. 1.6 zaznaczono, które składowe widma o intensywności $I > 1600$ zarejestrowano w trakcie pomiaru ulotu emitowanego wokół powierzchni badanej linii dla różnych wartości napięć przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm. Składowe widma o intensywności $I > 1600$ podliczono i przedstawiono w sposób zbiorczy na rys. 1.7 dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami badanej linii.



Rys. 1.5 Zestawienie zbiorcze intensywności widma dla $I > 1600$ zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości $d=36$ cm (w celu podniesienia czytelności rysunku zastosowano różne kolory).

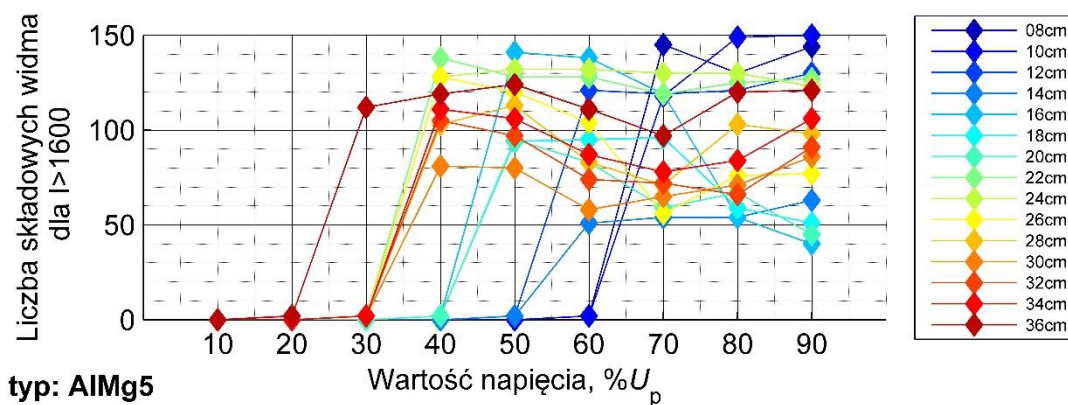


Rys. 1.6 Składowe widma o intensywności $I > 1600$ występujące w sygnałach zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości $d=36\text{cm}$ między przewodami linii typu AIMg5.



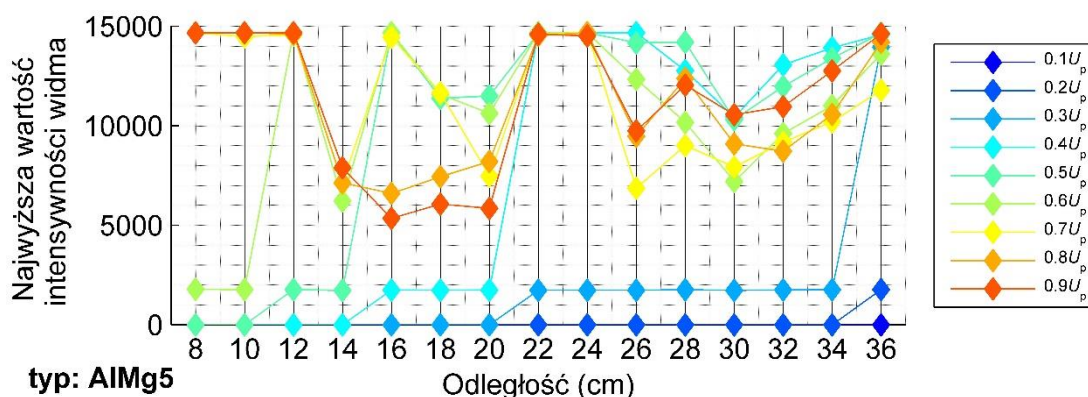
Rys. 1.7 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych wartości napięcia generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii typu AIMg5.

Na rys. 1.8 przedstawiono składowe widma o intensywności $I > 1600$ dla różnych odległości między przewodami linii typu AIMg5 w funkcji napięcia generacji ulotu.



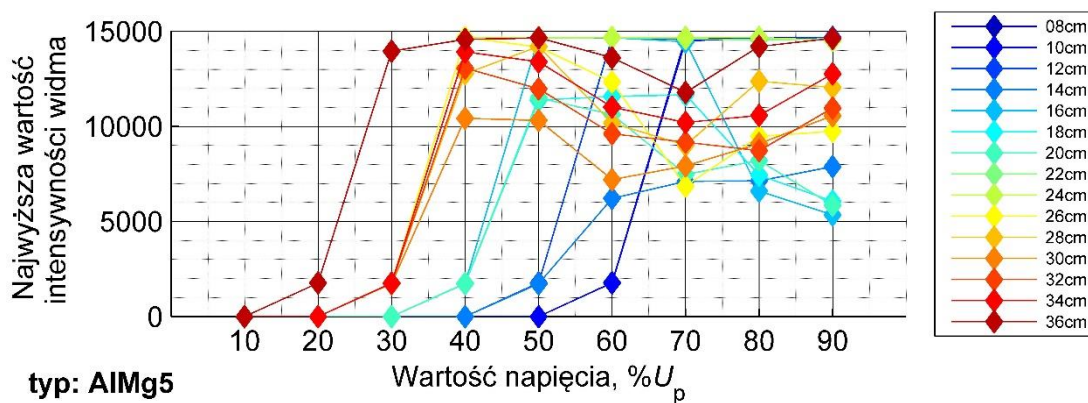
Rys. 1.8 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych odległości między przewodami linii typu AIMg5 w funkcji napięcia generacji ulotu.

Na rys. 1.9 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii wykonanymi z aluminium z domieszką magnezu.



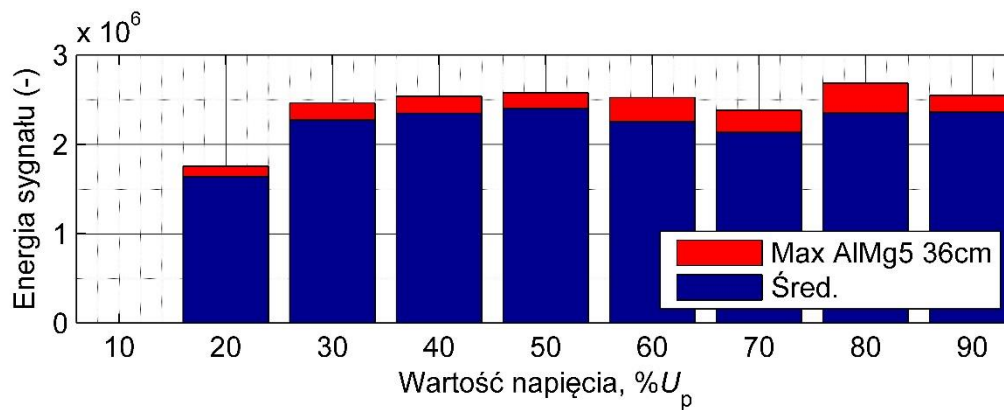
Rys. 1.9 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych wartości napięcia generacji w funkcji odległości między przewodami linii typu AlMg5.

Na rys. 1.10 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla różnych odległości między przewodami linii typu AlMg5 w funkcji napięcia generacji ulotu.



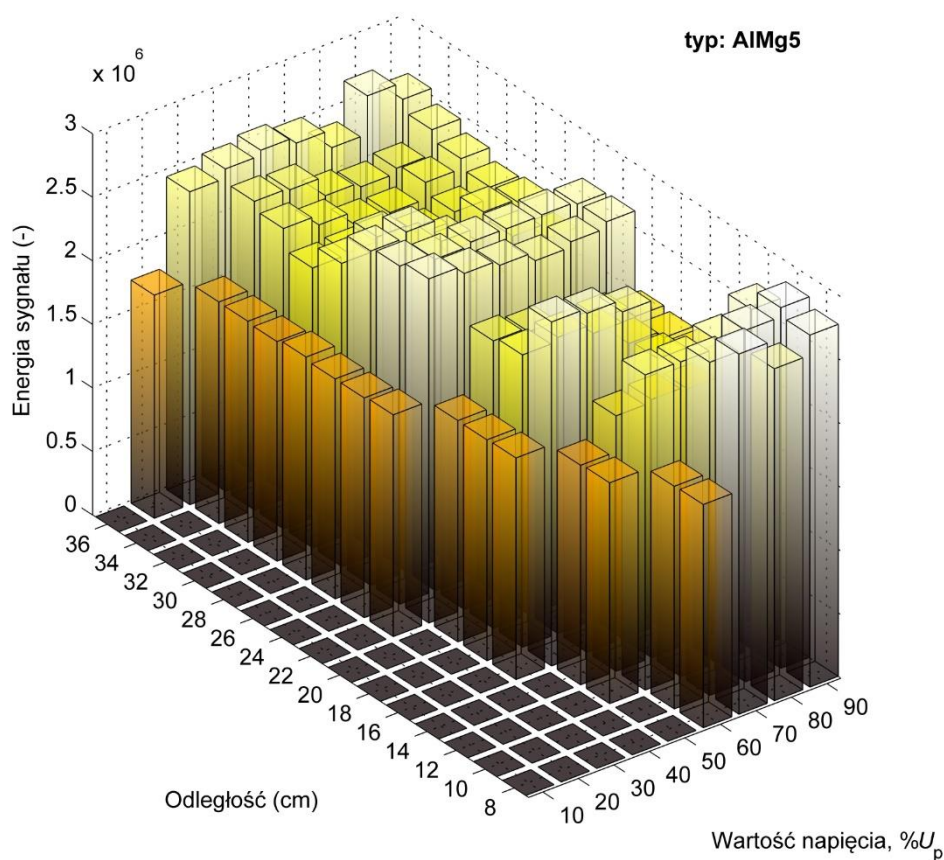
Rys. 1.10 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych odległości między przewodami linii typu AlMg5 w funkcji wartości napięcia generacji.

Na rys. 1.11 przedstawiono energię sygnału obliczoną dla wartości maksymalnych i średnich intensywności widma podczas pomiarów przy różnych napięciach generacji ulotu przy odległości między przewodami linii typu AlMg5 $d=36\text{cm}$. Energia sygnału została tutaj policzona jako pole pod krzywą czyli suma wszystkich wartości składowych widma wyłącznie w celach porównawczych, stąd jest wartością bezwymiarową (umowna ilość jednostek energii).



Rys. 1.11 Zależność energii sygnału obliczonej dla maksymalnej (Max) i średniej intensywności widma emitowanego przez ulot przy odległości $d=36$ cm między przewodami linii typu AIMg5 w funkcji napięcia generacji.

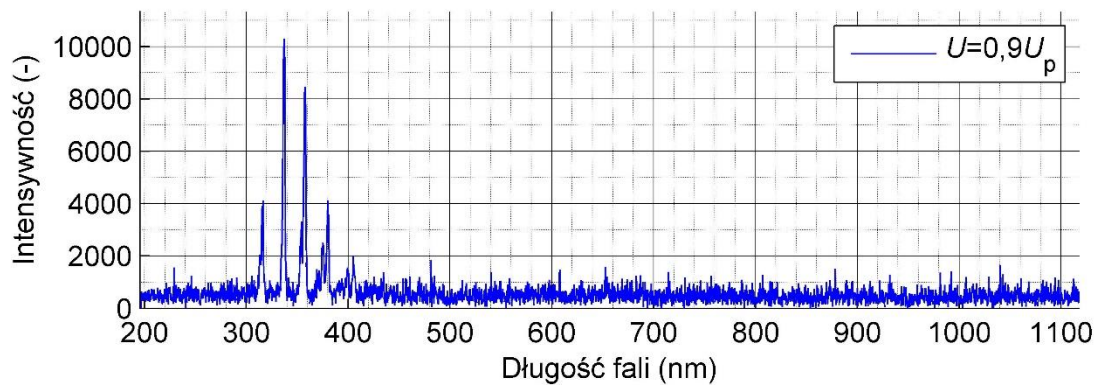
Na rys. 1.12 przedstawiono w sposób zbiorczy wartości energii sygnałów obliczone dla uśrednionych intensywności widma emisyjnego emitowanego przy różnych napięciach generacji ulotu i różnych odległościach między przewodami linii typu AIMg5.



Rys. 1.12 Zależność energii sygnału obliczonej dla uśrednionych intensywności widma emitowanego przez ulot w funkcji odległości d i w funkcji napięcia generacji.

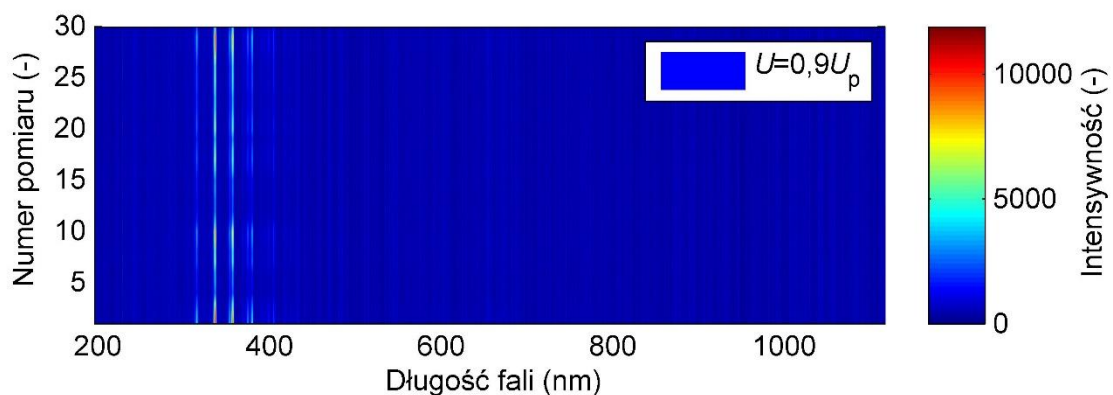
2. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu, typ AlSi5

Na rys. 2.1 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu podczas pomiarów, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



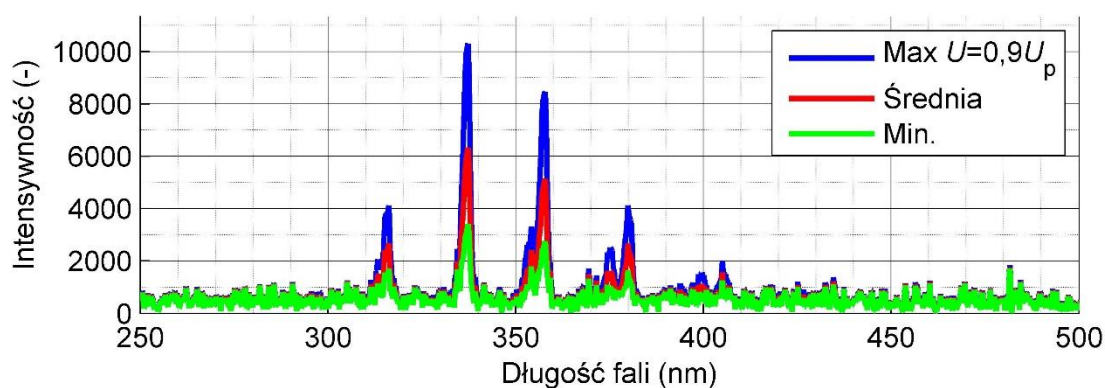
Rys. 2.1 Intensywność i struktura widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej krzemem aluminiowej linii przy napięciu $0,9U_p = 110,7$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 2.2 przedstawiono zestawienie zbiorcze wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$, dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów, czyli dla 30 pomiarów.



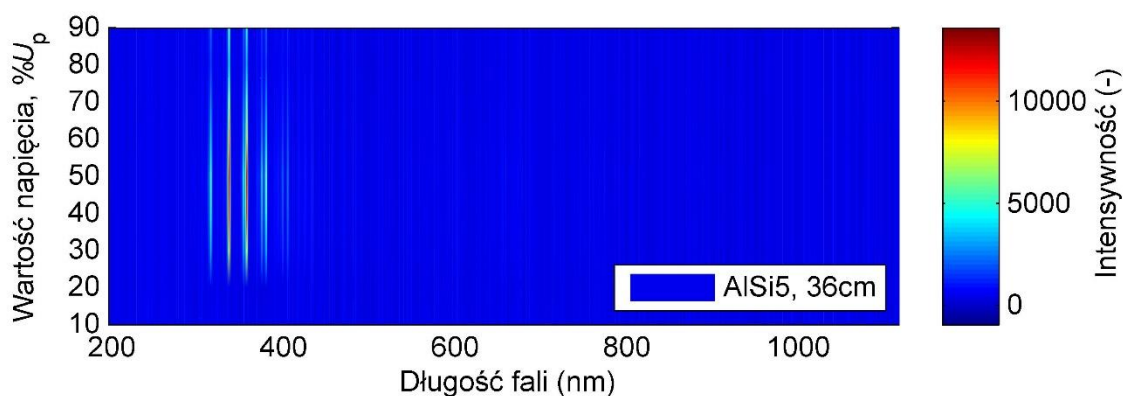
Rys. 2.2 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej krzemem aluminiowej linii przy napięciu $0,9U_p = 110,7$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 2.3 przedstawiono podstawowe statystyki uzyskane z 30 pomiarów: wartość średniej arytmetycznej, maksymalną i minimalną, obliczone dla intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



Rys. 2.3 Wartość maksymalna (Max), średnia i minimalna (Min.) intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej krzemem aluminiowej linii przy napięciu $0,9U_p = 110,7$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 2.4 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych ze wszystkich pomiarów wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wszystkich analizowanych wartości napięcia generacji ulotu.

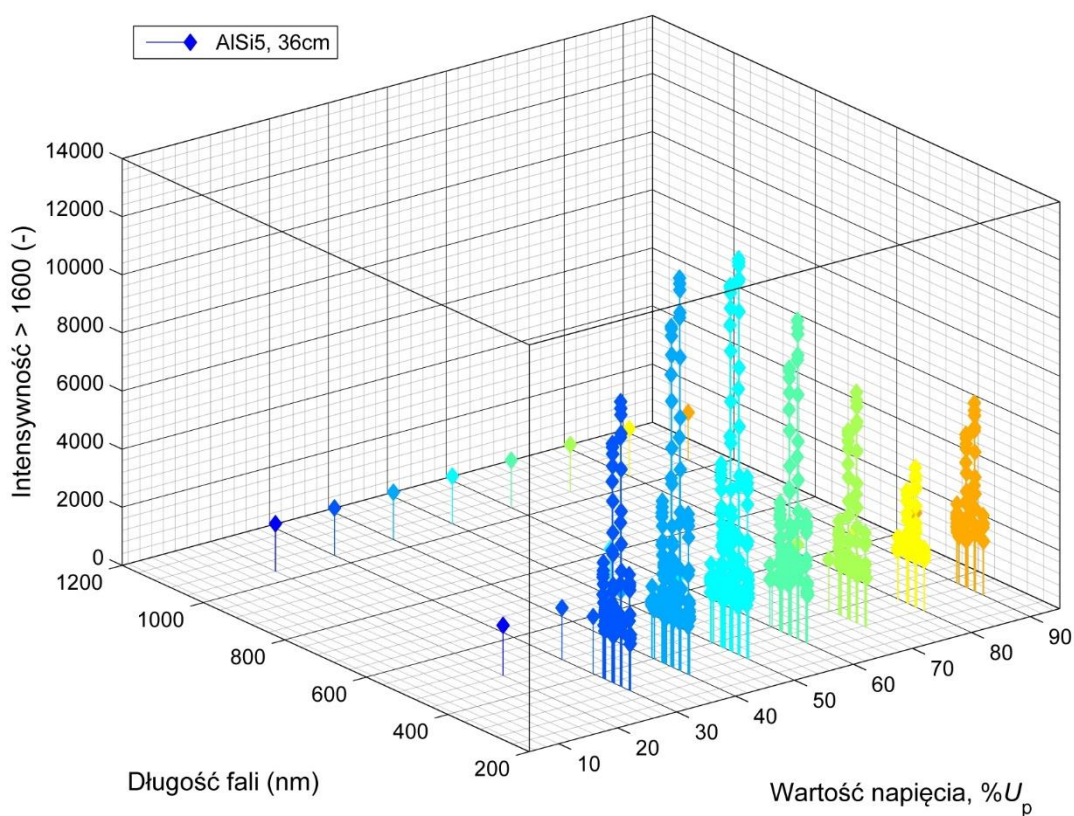


Rys. 2.4 Zależność uśrednionych wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej krzemem aluminiowej linii przy odległości $d=36$ cm od napięcia generacji ulotu.

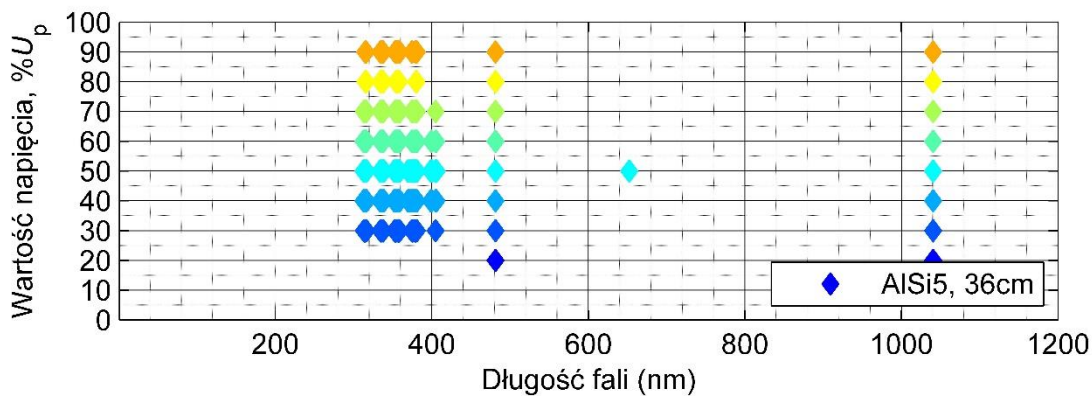
W celu analizy dominujących składowych widma na rys. 2.5 przedstawiono zbiorcze zestawienie intensywności przekraczających wartość 1600 ($I > 1600$) uzyskanych podczas pomiarów widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni

linii wykonanej z aluminium z domieszką krzemu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm w funkcji napięcia generacji ulotu.

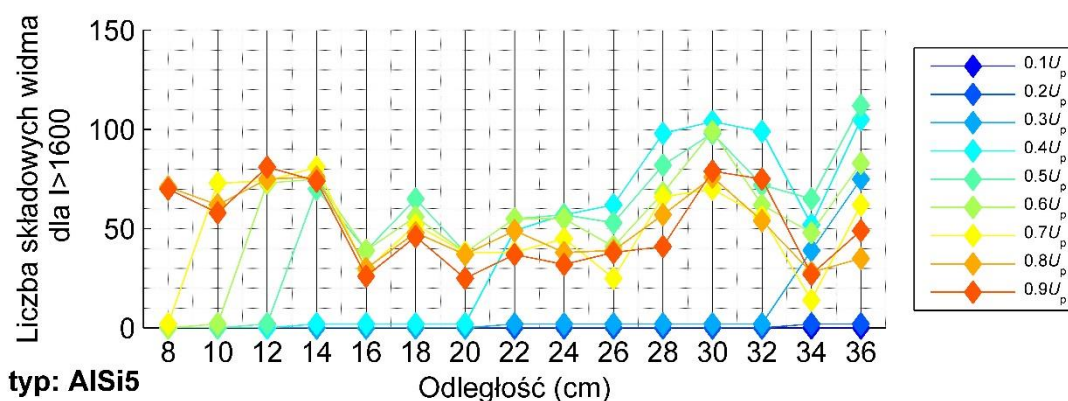
Na rys. 2.6 zaznaczono, które składowe widma o intensywności $I > 1600$ zarejestrowano w trakcie pomiaru ulotu emitowanego wokół powierzchni badanej linii dla różnych wartości napięć przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm. Składowe widma o intensywności $I > 1600$ podliczono i przedstawiono w sposób zbiorczy na rys. 2.7 dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami badanej linii.



Rys. 2.5 Zestawienie zbiorcze intensywności widma dla $I > 1600$ zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości $d=36$ cm (w celu podniesienia czytelności rysunku zastosowano różne kolory).

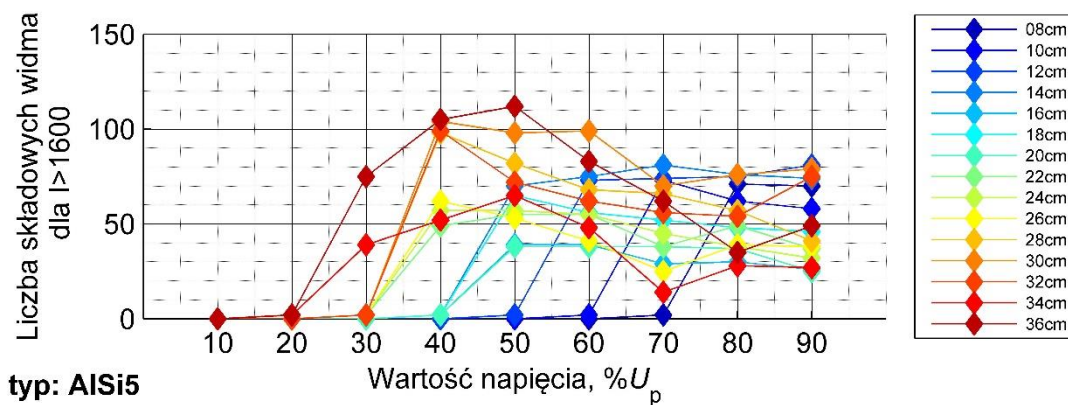


Rys. 2.6 Składowe widma o intensywności $I > 1600$ występujące w sygnałach zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości $d=36\text{cm}$ między przewodami linii typu AISi5.



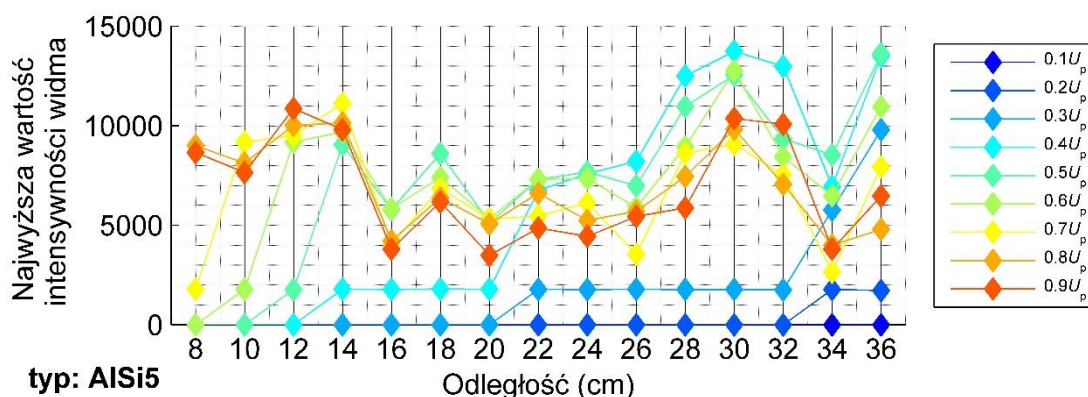
Rys. 2.7 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych wartości napięcia generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii typu AISi5.

Na rys. 2.8 przedstawiono składowe widma o intensywności $I > 1600$ dla różnych odległości między przewodami linii typu AISi5 w funkcji napięcia generacji ulotu.



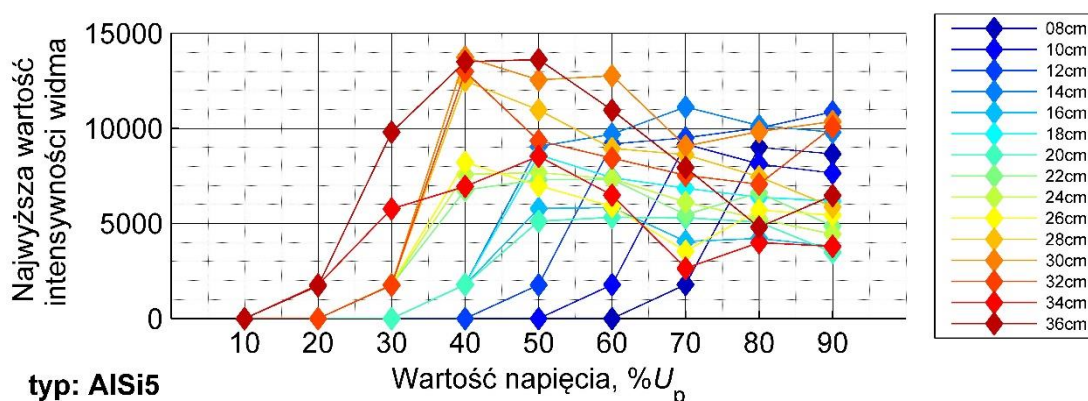
Rys. 2.8 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych odległości między przewodami linii typu AISi5 w funkcji napięcia generacji ulotu.

Na rys. 2.9 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii wykonanymi z aluminium z domieszką krzemu.



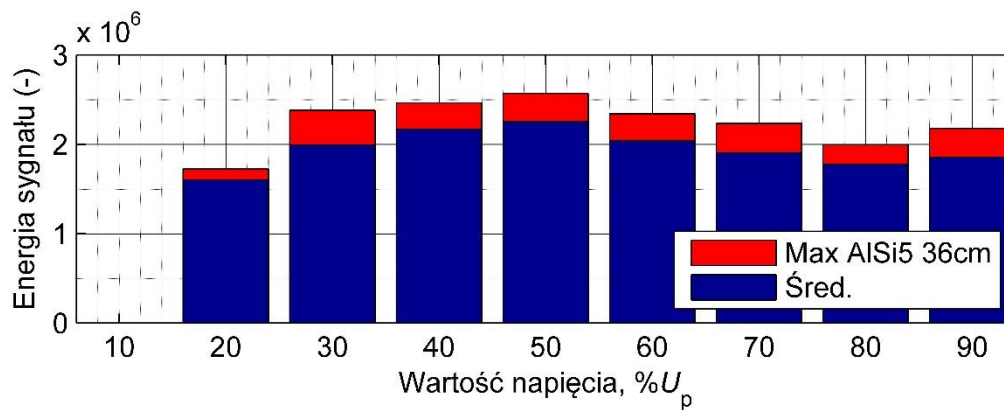
Rys. 2.9 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych wartości napięcia generacji w funkcji odległości między przewodami linii typu AlMg5.

Na rys. 2.10 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla różnych odległości między przewodami linii typu AISi5 w funkcji napięcia generacji ulotu.



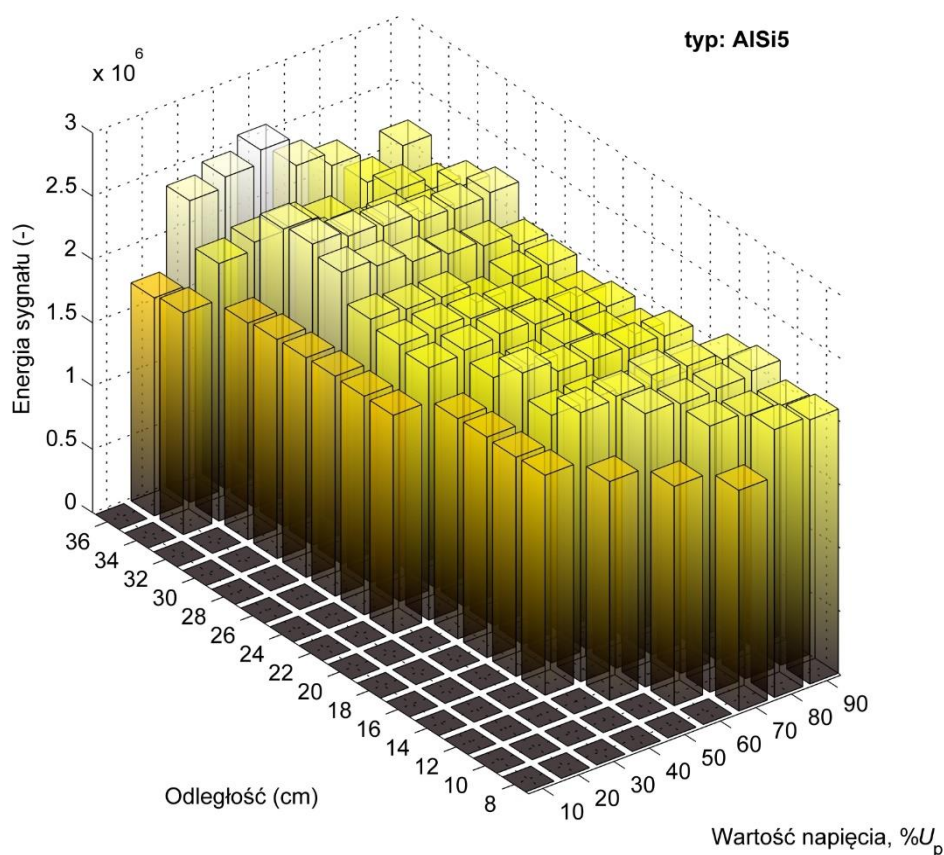
Rys. 2.10 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych odległości między przewodami linii typu AISi5 w funkcji wartości napięcia generacji.

Na rys. 2.11 przedstawiono energię sygnału obliczoną dla wartości maksymalnych i średnich intensywności widma podczas pomiarów przy różnych napięciach generacji ulotu przy odległości między przewodami linii typu AISi5 $d=36\text{cm}$. Energia sygnału została tutaj policzona jako pole pod krzywą czyli suma wszystkich wartości składowych widma wyłącznie w celach porównawczych, stąd jest wartością bezwymiarową (umowna ilość jednostek energii).



Rys. 2.11 Zależność energii sygnału obliczonej dla maksymalnej (Max) i średniej intensywności widma emitowanego przez ulot przy odległości $d=36$ cm między przewodami linii typu AlSi5 w funkcji napięcia generacji.

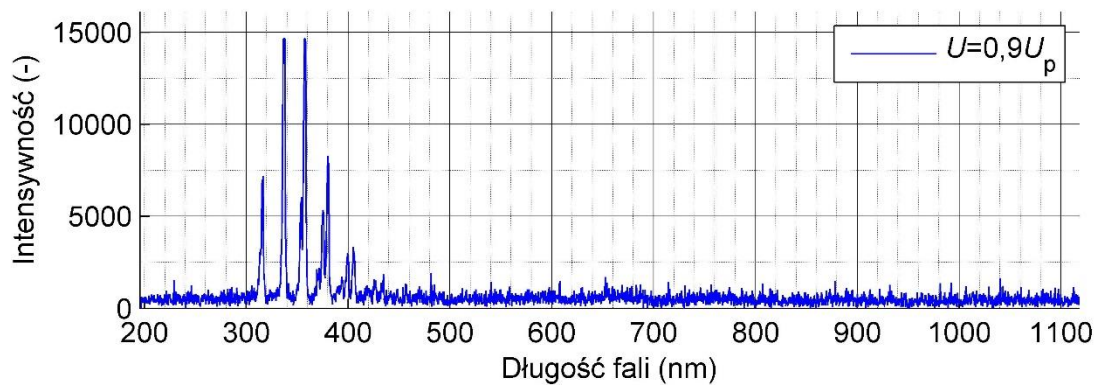
Na rys. 2.12 przedstawiono w sposób zbiorczy wartości energii sygnałów obliczone dla uśrednionych intensywności widma emisyjnego emitowanego przy różnych napięciach generacji ulotu i różnych odległościach między przewodami linii typu AlSi5.



Rys. 2.12 Zależność energii sygnału obliczonej dla uśrednionych intensywności widma emitowanego przez ulot w funkcji odległości d i w funkcji napięcia generacji.

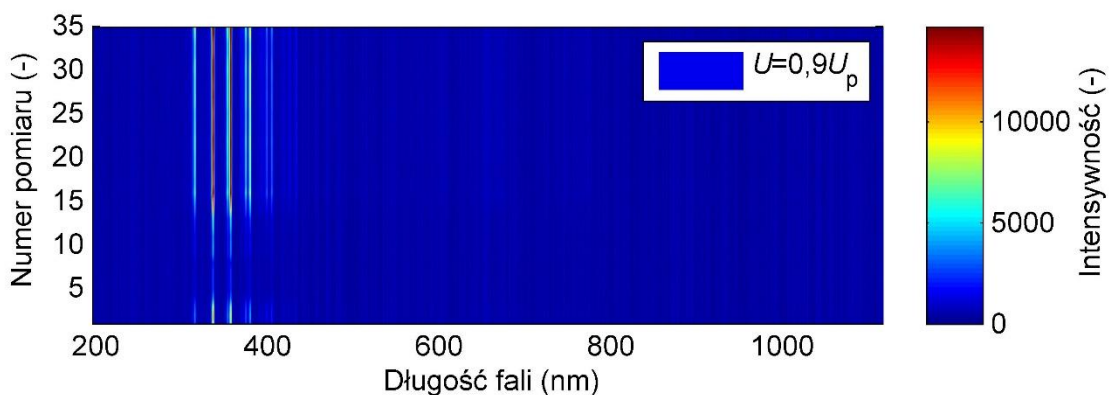
3. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, typ FeCu

Na rys. 3.1 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią podczas pomiarów przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



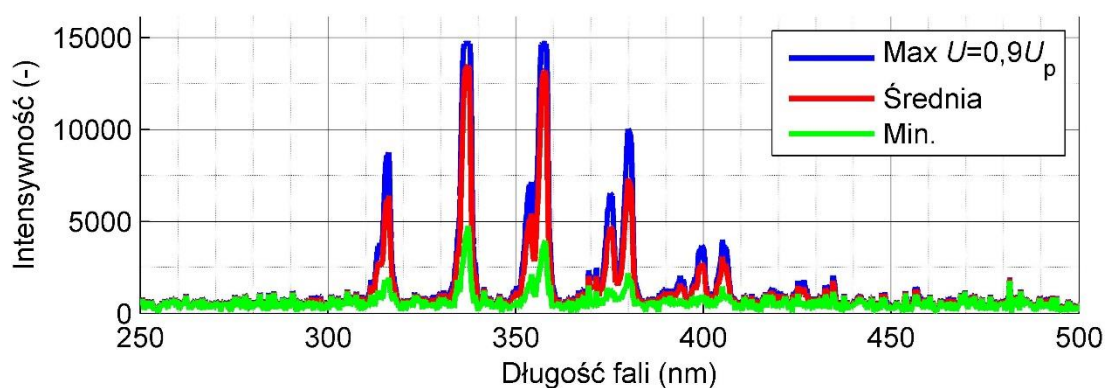
Rys. 3.1 Intensywność i struktura widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół pokrytej miedzią stalowej linii przy napięciu $0,9U_p = 112,2$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 3.2 przedstawiono zestawienie zbiorcze wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$, dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów, czyli dla 30 pomiarów.



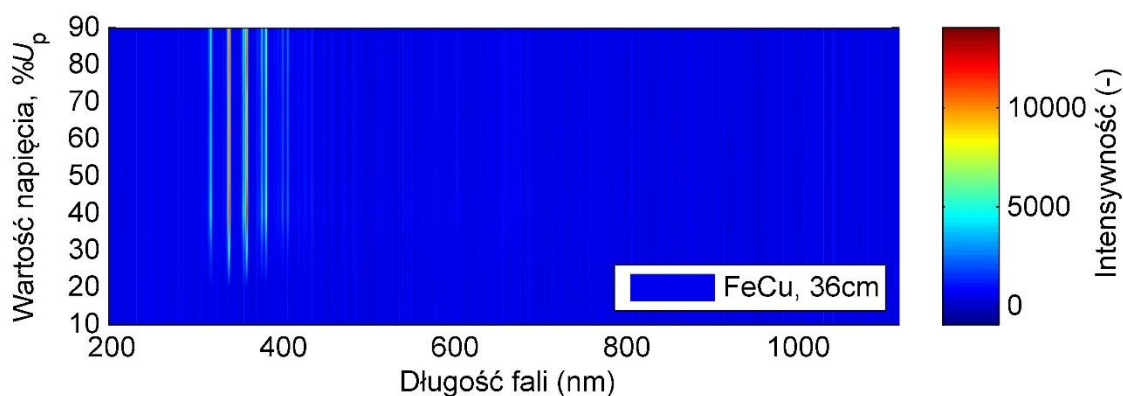
Rys. 3.2 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół pokrytej miedzią stalowej linii przy napięciu $0,9U_p = 112,2$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 3.3 przedstawiono podstawowe statystyki uzyskane z 30 pomiarów: wartość średniej arytmetycznej, maksymalną i minimalną, obliczone dla intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



Rys. 3.3 Wartość maksymalna (Max), średnia i minimalna (Min.) intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół pokrytej miedzią stalowej linii przy napięciu $0,9U_p = 112,2$ kV i odległości $d=36$ cm.

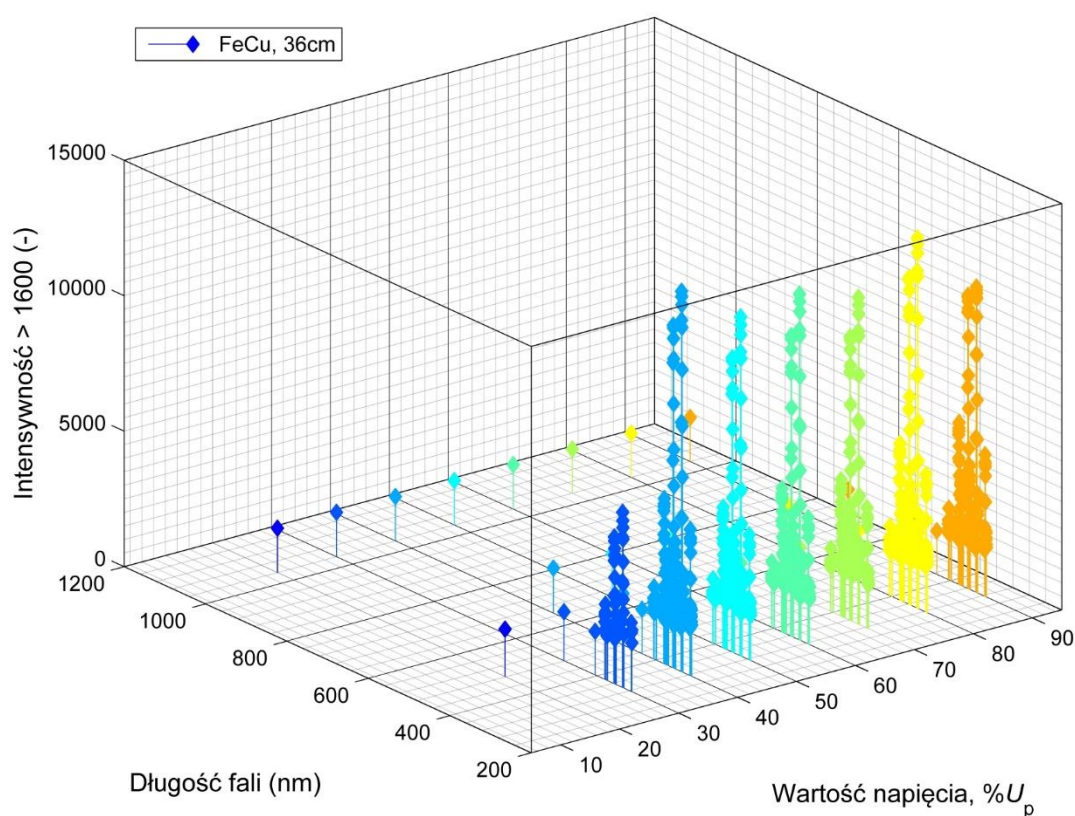
Na rys. 3.4 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych ze wszystkich pomiarów wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wszystkich analizowanych wartości napięcia generacji ulotu.



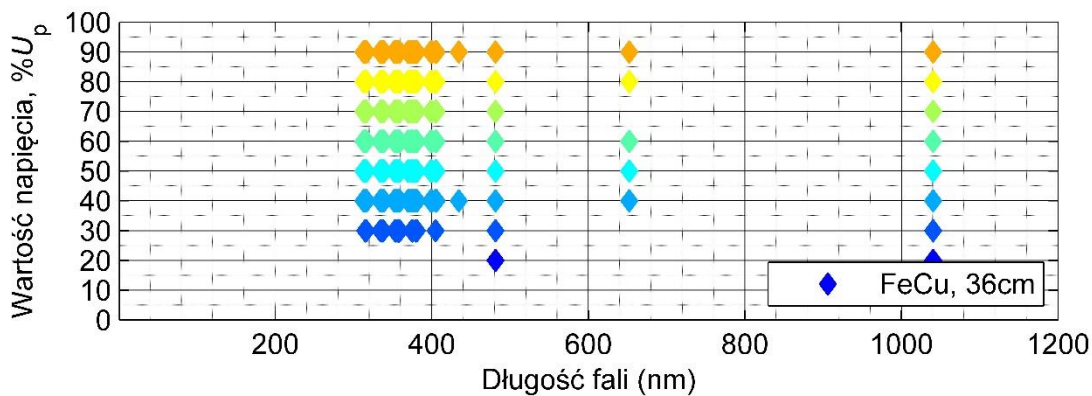
Rys. 3.4 Zależność uśrednionych wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół pokrytej miedzią stalowej linii przy odległości $d=36$ cm od napięcia generacji ulotu.

W celu analizy dominujących składowych widma na rys. 3.5 przedstawiono zbiorcze zestawienie intensywności przekraczających wartość 1600 ($I > 1600$) uzyskanych podczas pomiarów widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm w funkcji napięcia generacji ulotu.

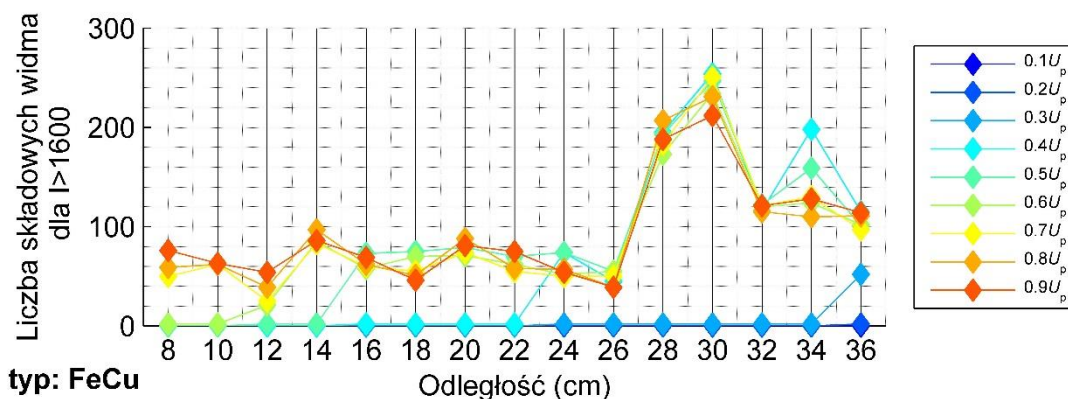
Na rys. 3.6 zaznaczono, które składowe widma o intensywności $I > 1600$ zarejestrowano w trakcie pomiaru ulotu emitowanego wokół powierzchni badanej linii dla różnych wartości napięć przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm. Składowe widma o intensywności $I > 1600$ podliczono i przedstawiono w sposób zbiorczy na rys. 3.7 dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami badanej linii.



Rys. 3.5 Zestawienie zbiorcze intensywności widma dla $I > 1600$ zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości $d=36$ cm (w celu podniesienia czytelności rysunku zastosowano różne kolory).

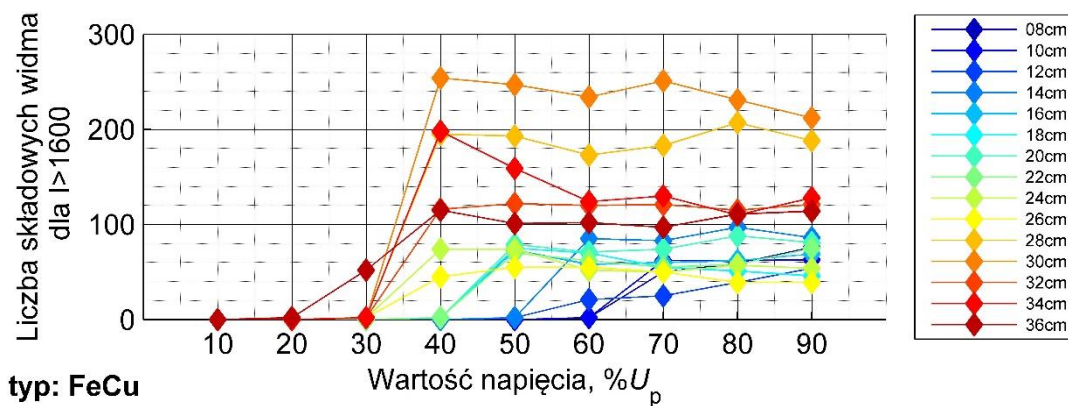


Rys. 3.6 Składowe widma o intensywności $I > 1600$ występujące w sygnałach zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości $d=36\text{cm}$ między przewodami linii typu FeCu.



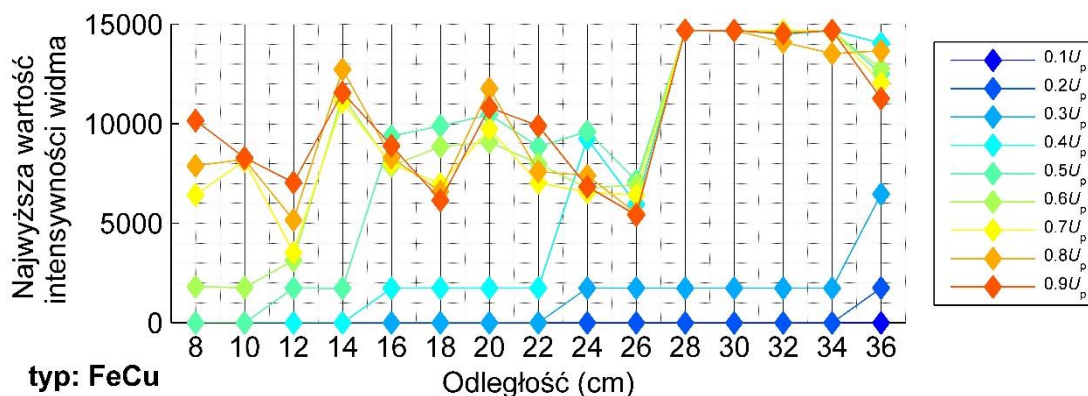
Rys. 3.7 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych wartości napięcia generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii typu FeCu.

Na rys. 3.8 przedstawiono składowe widma o intensywności $I > 1600$ dla różnych odległości między przewodami linii typu FeCu w funkcji napięcia generacji ulotu.



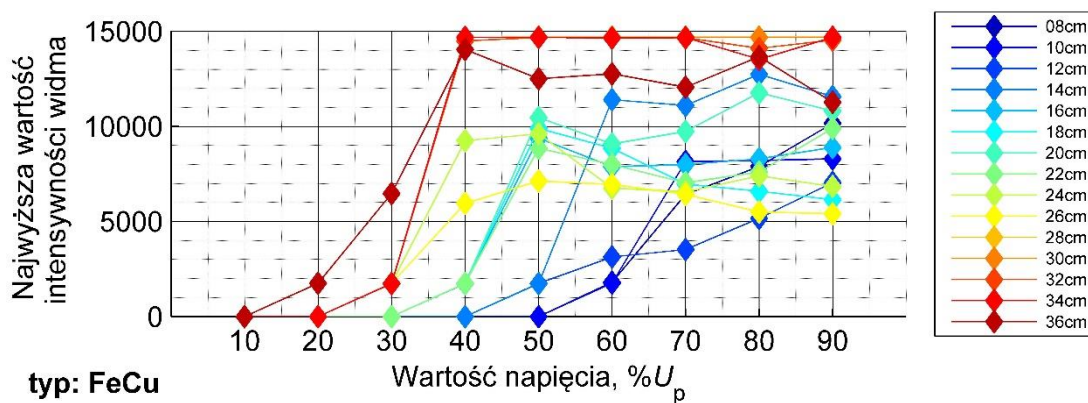
Rys. 3.8 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych odległości między przewodami linii typu FeCu w funkcji napięcia generacji ulotu.

Na rys. 3.9 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii wykonanej ze stali pokrytej miedzią.



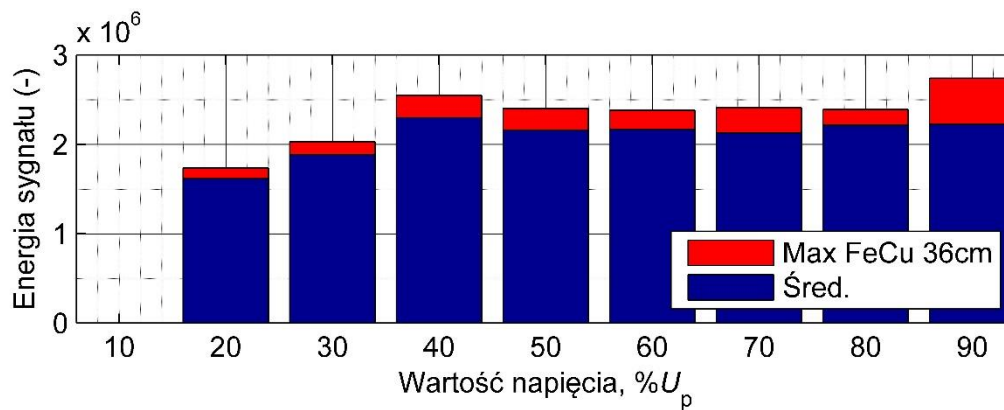
Rys. 3.9 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych wartości napięcia generacji w funkcji odległości między przewodami linii typu FeCu.

Na rys. 3.10 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla różnych odległości między przewodami linii typu FeCu w funkcji napięcia generacji ulotu.



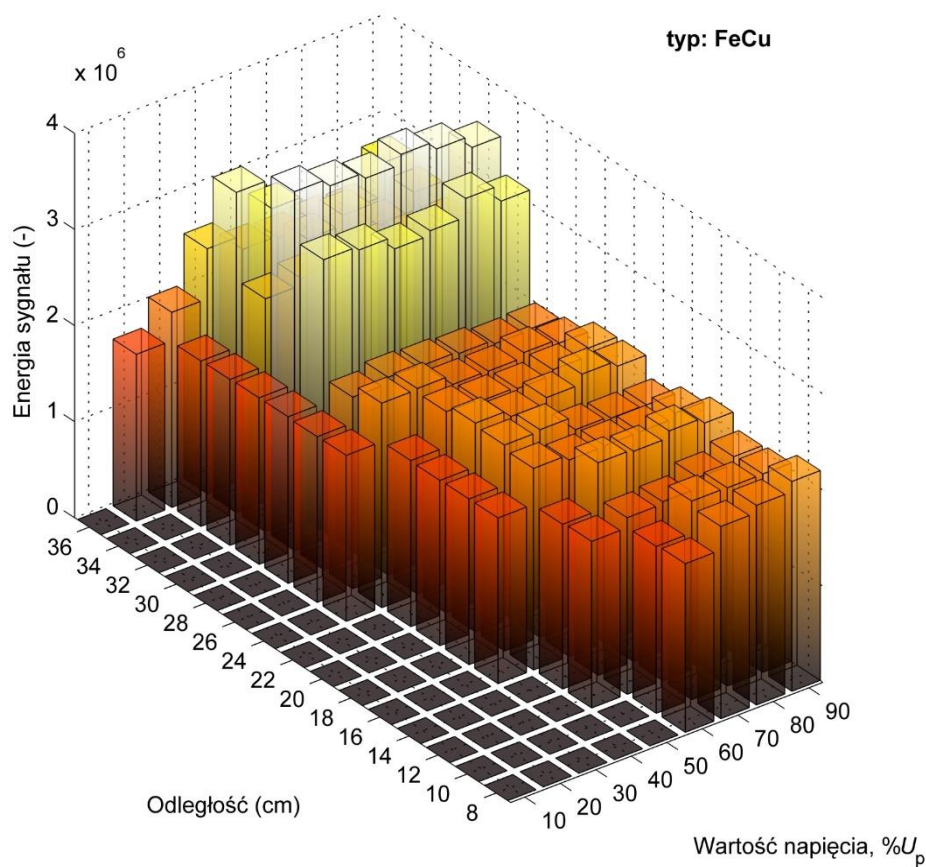
Rys. 3.10 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych odległości między przewodami linii typu FeCu w funkcji wartości napięcia generacji.

Na rys. 3.11 przedstawiono energię sygnału obliczoną dla wartości maksymalnych i średnich intensywności widma podczas pomiarów przy różnych napięciach generacji ulotu przy odległości między przewodami linii typu FeCu $d=36\text{cm}$. Energia sygnału została tutaj policzona jako pole pod krzywą czyli suma wszystkich wartości składowych widma wyłącznie w celach porównawczych, stąd jest wartością bezwymiarową (umowna ilość jednostek energii).



Rys. 3.11 Zależność energii sygnału obliczonej dla maksymalnej (Max) i średniej intensywności widma emitowanego przez ulot przy odległości $d=36$ cm między przewodami linii typu FeCu w funkcji napięcia generacji.

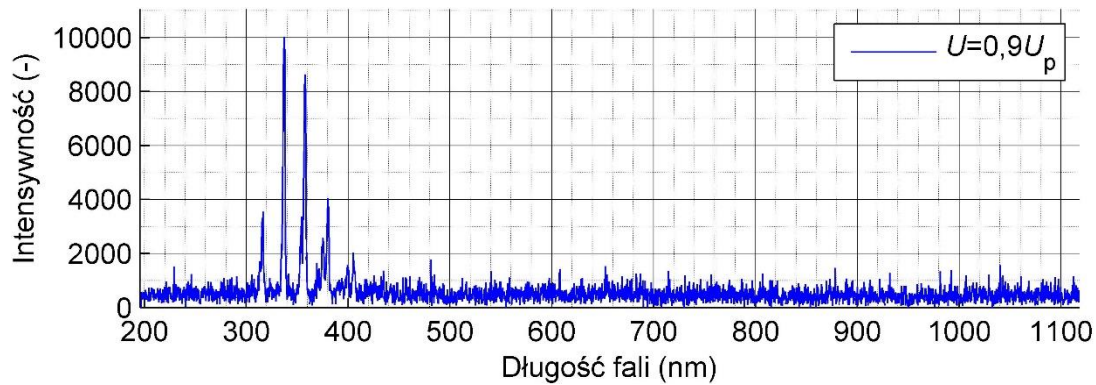
Na rys. 3.12 przedstawiono w sposób zbiorczy wartości energii sygnałów obliczone dla uśrednionych intensywności widma emisyjnego emitowanego przy różnych napięciach generacji ulotu i różnych odległościach między przewodami linii typu FeCu.



Rys. 3.12 Zależność energii sygnału obliczonej dla uśrednionych intensywności widma emitowanego przez ulot w funkcji odległości d i w funkcji napięcia generacji.

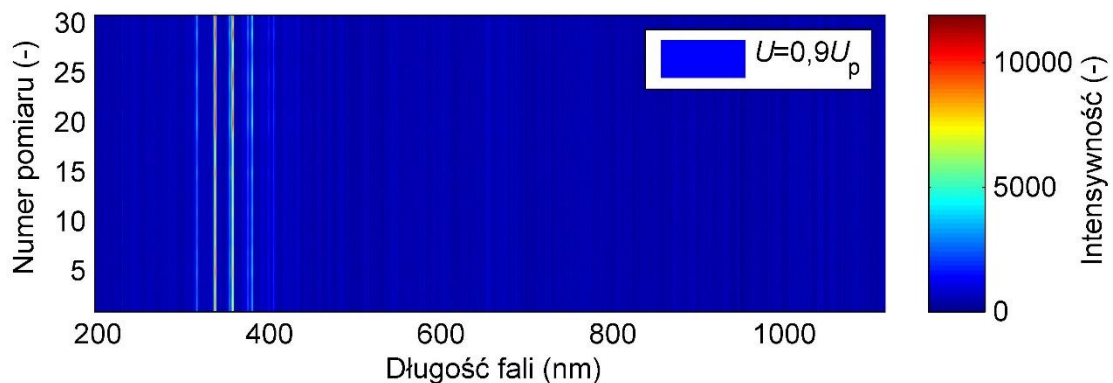
4. Wyniki pomiarów intensywności widma zarejestrowane dla linii wykonanej z aluminium z domieszką magnezu, typ MIG308LSi

Na rys. 4.1 przedstawiono zarejestrowane wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół powierzchni linii wykonanej ze stali z domieszką chromu i niklu podczas pomiarów, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wartości napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



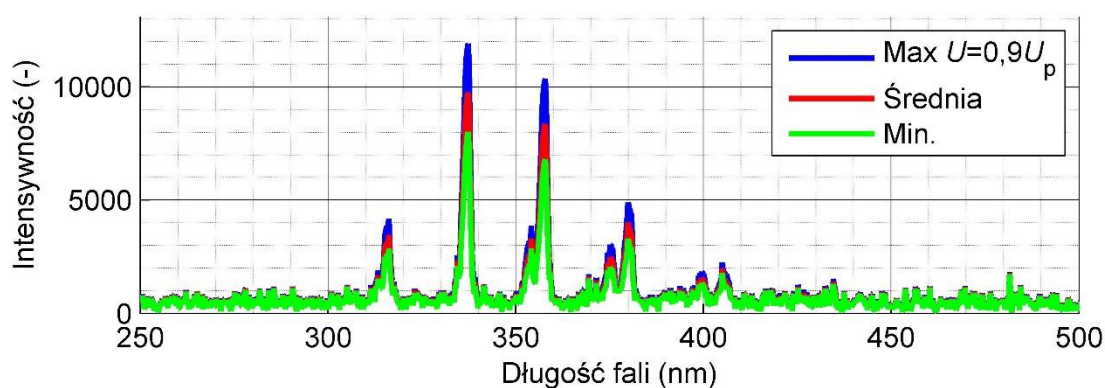
Rys. 4.1 Intensywność i struktura widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej chromem i niklem stalowej linii przy napięciu $0,9U_p = 107,6$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 4.2 przedstawiono zestawienie zbiorcze wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej ze stali z domieszką chromu i niklu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$, dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów, czyli dla 30 pomiarów.



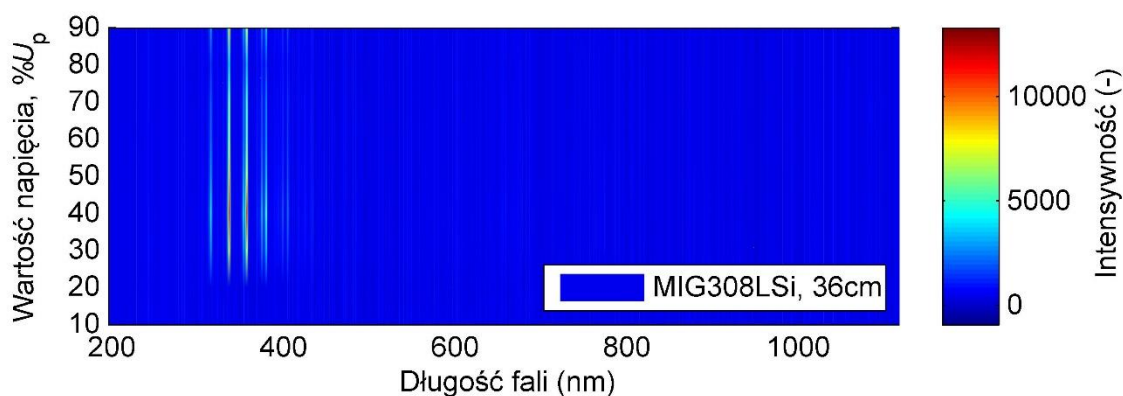
Rys. 4.2 Zestawienie zbiorcze wszystkich zarejestrowanych intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej chromem i niklem stalowej linii przy napięciu $0,9U_p = 107,6$ kV i odległości $d=36$ cm.

Na rys. 4.3 przedstawiono podstawowe statystyki uzyskane z 30 pomiarów: wartość średniej arytmetycznej, maksymalną i minimalną, obliczone dla intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej ze stali z domieszką chromu i niklu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla napięcia generacji ulotu odpowiadającej $0,9U_p$.



Rys. 4.3 Wartość maksymalna (Max), średnia i minimalna (Min.) intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej chromem i niklem stalowej linii przy napięciu $0,9U_p = 107,6$ kV i odległości $d = 36$ cm.

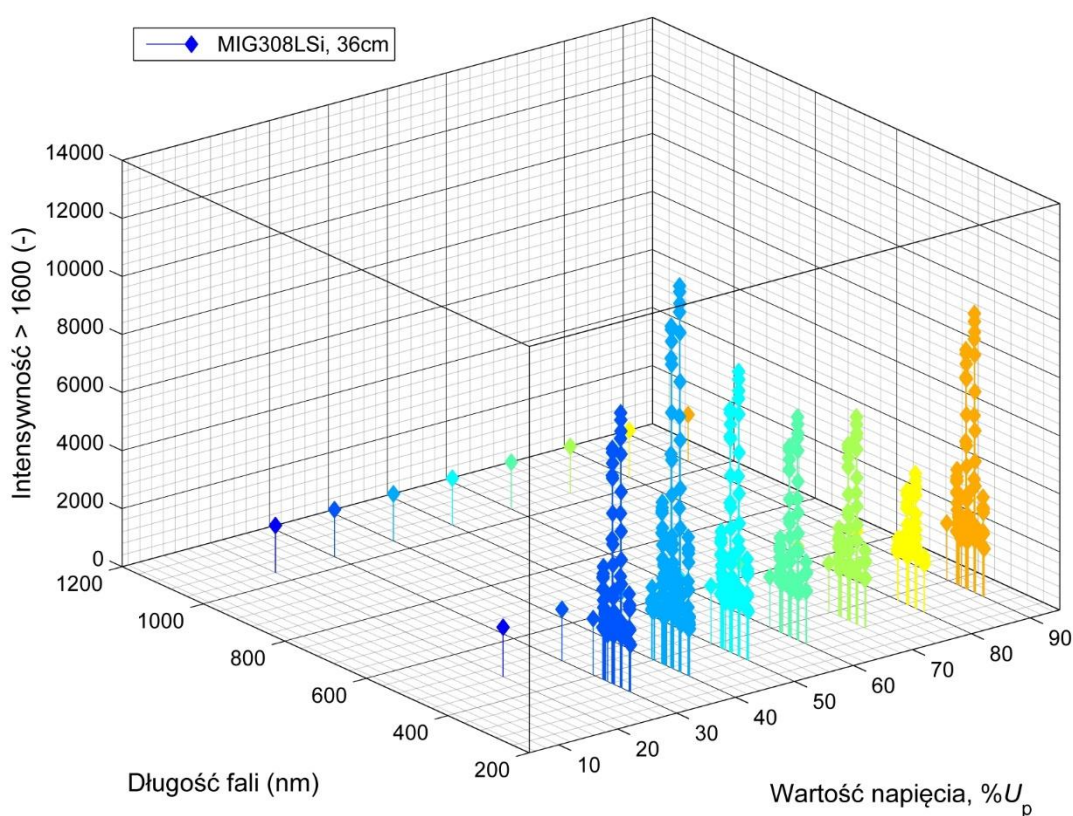
Na rys. 4.4 przedstawiono zestawienie zbiorcze uśrednionych ze wszystkich pomiarów wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej ze stali z domieszką chromu i niklu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm, dla wszystkich analizowanych wartości napięcia generacji ulotu.



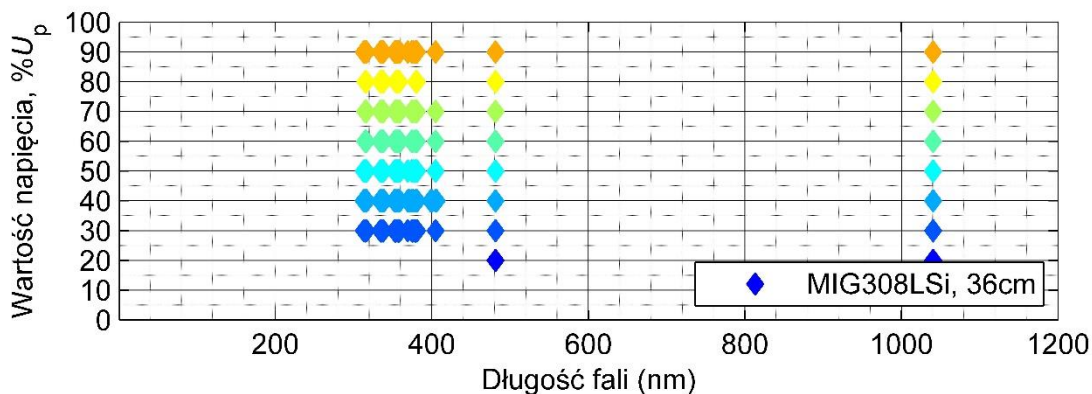
Rys. 4.4 Zależność uśrednionych wartości intensywności widma emisyjnego emitowanego przez ulot generowany wokół domieszkowanej chromem i niklem stalowej linii przy odległości $d = 36$ cm od napięcia generacji ulotu.

W celu analizy dominujących składowych widma na rys. 4.5 przedstawiono zbiorcze zestawienie intensywności przekraczających wartość 1600 ($I > 1600$) uzyskanych podczas pomiarów widma emisyjnego emitowanego przez wyładowania ulotowe wokół powierzchni linii wykonanej ze stali z domieszką chromu i niklu, przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm w funkcji napięcia generacji ulotu.

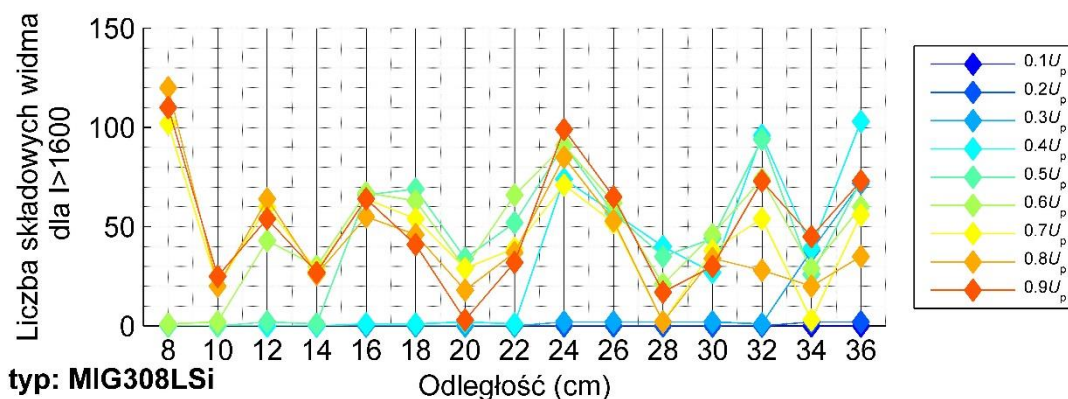
Na rys. 4.6 zaznaczono, które składowe widma o intensywności $I > 1600$ zarejestrowano w trakcie pomiaru ulotu emitowanego wokół powierzchni badanej linii dla różnych wartości napięć przy odległości między przewodami linii $d = 36$ cm. Składowe widma o intensywności $I > 1600$ podliczono i przedstawiono w sposób zbiorczy na rys. 4.7 dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami badanej linii.



Rys. 4.5 Zestawienie zbiorcze intensywności widma dla $I > 1600$ zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości $d=36$ cm (w celu podniesienia czytelności rysunku zastosowano różne kolory).

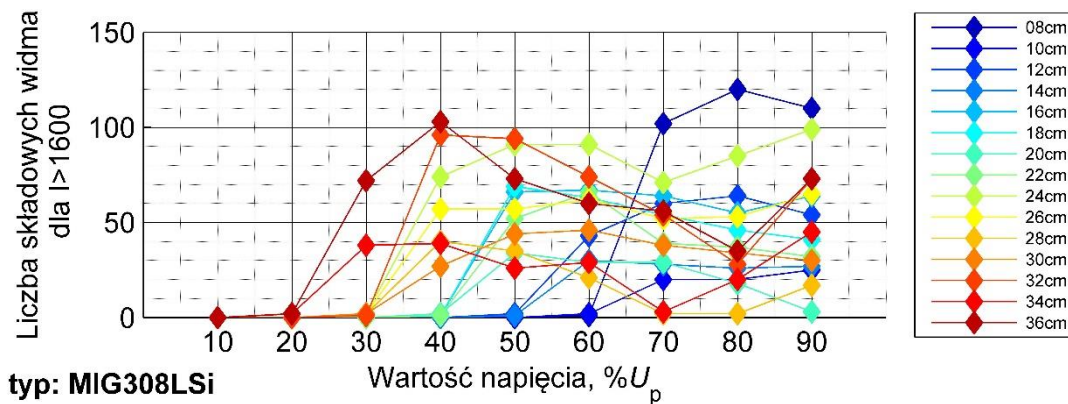


Rys. 4.6 Składowe widma o intensywności $I > 1600$ występujące w sygnałach zarejestrowanych dla różnych wartości napięć przy odległości $d=36\text{cm}$ między przewodami linii typu MIG308LSi.



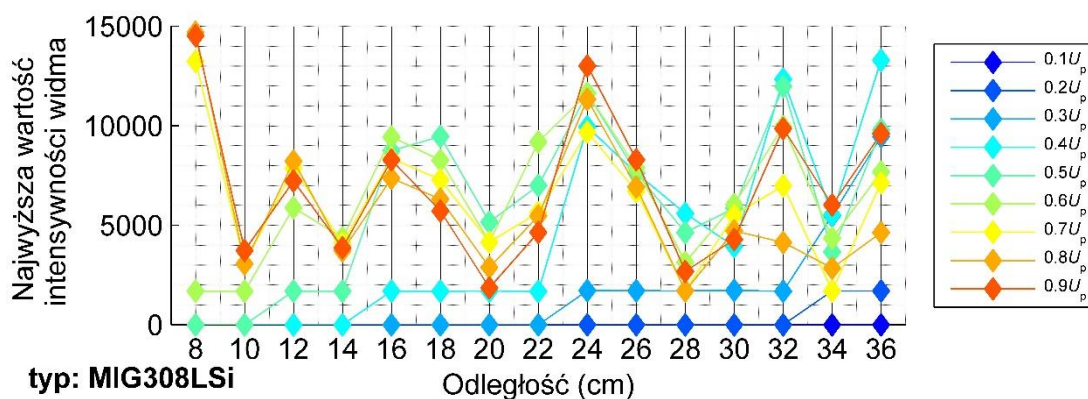
Rys. 4.7 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych wartości napięcia generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii typu MIG308LSi.

Na rys. 4.8 przedstawiono składowe widma o intensywności $I > 1600$ dla różnych odległości między przewodami linii typu MIG308LSi w funkcji napięcia generacji ulotu.



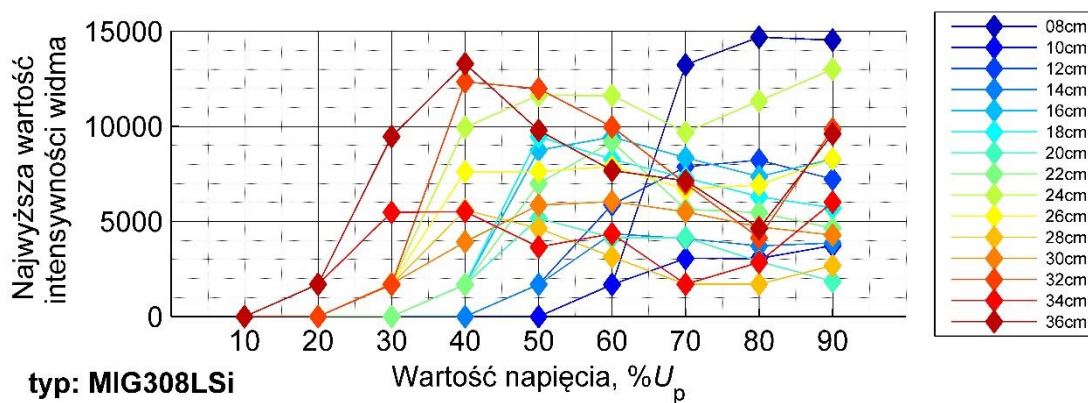
Rys. 4.8 Zależność liczby składowych widma o intensywności $I > 1600$, dla różnych odległości między przewodami linii typu MIG308LSi w funkcji napięcia generacji ulotu.

Na rys. 4.9 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla każdego z napięć generacji ulotu w funkcji odległości między przewodami linii wykonanej ze stali z domieszką chromu i niklu.



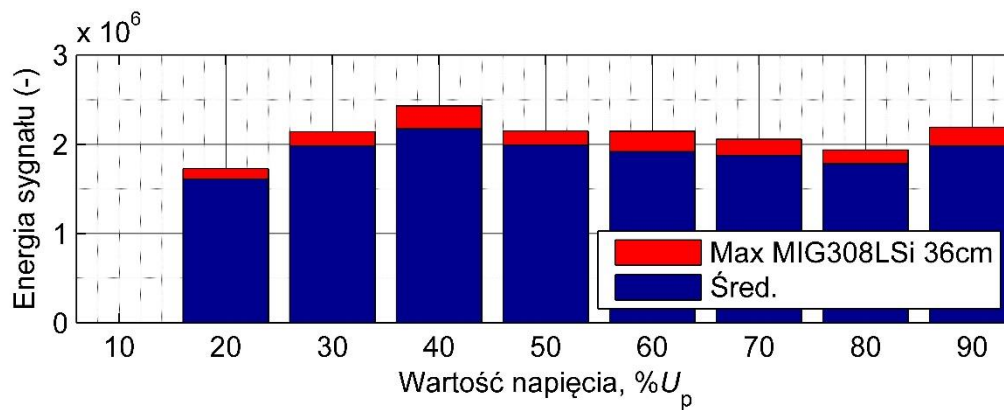
Rys. 4.9 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych wartości napięcia generacji w funkcji odległości między przewodami linii typu MIG308LSi.

Na rys. 4.10 przedstawiono najwyższe wartości intensywności (wartości maksymalne) dla różnych odległości między przewodami linii typu MIG308LSi w funkcji napięcia generacji ulotu.



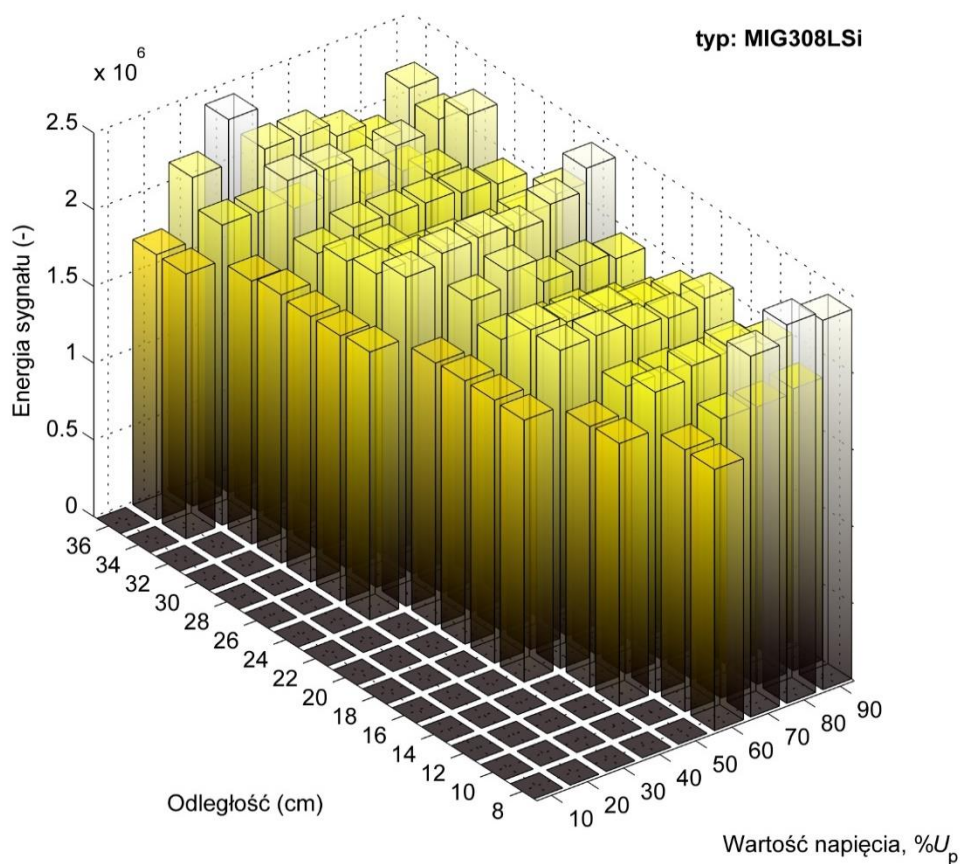
Rys. 4.10 Zależność wartości maksymalnej intensywności widma emitowanego przez ulot dla różnych odległości między przewodami linii typu MIG308LSi w funkcji wartości napięcia generacji.

Na rys. 4.11 przedstawiono energię sygnału obliczoną dla wartości maksymalnych i średnich intensywności widma podczas pomiarów przy różnych napięciach generacji ulotu przy odległości między przewodami linii typu MIG308LSi $d=36\text{cm}$. Energia sygnału została tutaj policzona jako pole pod krzywą czyli suma wszystkich wartości składowych widma wyłącznie w celach porównawczych, stąd jest wartością bezwymiarową (umowna ilość jednostek energii).



Rys. 4.11 Zależność energii sygnału obliczonej dla maksymalnej (Max) i średniej intensywności widma emitowanego przez ulot przy odległości $d=36$ cm między przewodami linii typu MIG308LSi w funkcji napięcia generacji.

Na rys. 4.12 przedstawiono w sposób zbiorczy wartości energii sygnałów obliczone dla uśrednionych intensywności widma emisyjnego emitowanego przy różnych napięciach generacji ulotu i różnych odległościach między przewodami linii typu MIG308LSi.



Rys. 4.12 Zależność energii sygnału obliczonej dla uśrednionych intensywności widma emitowanego przez ulot w funkcji odległości d i w funkcji napięcia generacji.

ZAŁĄCZNIK NR 2

Płyta zawierająca wersję elektroniczną rozprawy doktorskiej i zestawienie w postaci graficznej wszystkich uzyskanych wyników pomiarów oraz analiz wraz z listingami programów prowadzonymi w środowisku MATLAB.