

MODEL WYŁADOWAŃ WYSOKONAPIĘCIOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIENNYCH PARAMETRÓW GAZU I UKŁADU ELEKTROD

europa
student
magazine

ISSN 2956-834X

Numer 2 / 2026

Mikołaj Brudnias, Karol Gębka, Jakub Kurek, Sebastian Zarzycki

¹ Studenckie Koło Naukowe „AUTOMATYK” - Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego

Streszczenie – Niniejsza praca dotyczy modelowania i symulacji wyładowań wysokonapięciowych w gazach z wykorzystaniem środowiska MATLAB/Simulink. Celem opracowania było wykonanie modelu umożliwiającego analizę napięcia przebicia w funkcji iloczynu ciśnienia i odległości międzyelektrodowej ($p \cdot d$) na podstawie prawa Paschena. W modelu uwzględniono wpływ rodzaju gazu, geometrii elektrod oraz wybranych parametrów środowiskowych, takich jak temperatura i wilgotność. Przeprowadzone symulacje pozwoliły wyznaczyć charakterystyki napięcia przeskoku dla różnych konfiguracji układu oraz porównać wpływ poszczególnych czynników na warunki inicjacji wyładowania. Dodatkowo przeanalizowano rozkład pola elektrycznego dla wybranych geometrii elektrod, wskazując wpływ niejednorodności pola na lokalną koncentrację potencjału i obniżenie napięcia przebicia. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność środowiska MATLAB/Simulink do analizy zjawisk związanych z przebiegiem elektrycznym w gazach oraz do wstępnej oceny parametrów układów wysokonapięciowych.

Słowa kluczowe – Wyładowania wysokonapięciowe, napięcie przebicia, prawo Paschena, MATLAB, pole elektryczne

WSTĘP

Celem pracy jest wykonanie modelu wyładowań wysokonapięciowych w środowisku MATLAB/Simulink oraz przeprowadzenie analizy zjawiska przebicia elektrycznego w gazach. Wyładowania tego typu odgrywają ważną rolę w elektroenergetyce i technice wysokich napięć, gdyż wpływają na stan izolacji oraz niezawodność pracy urządzeń elektrycznych. W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne wyładowań w gazach, ze szczególnym uwzględnieniem prawa Paschena, a także scharakteryzowano środowisko, w którym opracowano model symulacyjny. Następnie opisano budowę i zasadę działania modelu oraz zaprezentowano wyniki symulacji dla różnych parametrów wejściowych. Uzyskane rezultaty pozwalają ocenić wpływ warunków pracy układu na wartość napięcia przebicia i przebieg procesu wyładowania.

1 WYŁADOWANIA WYSOKONAPIĘCIOWE

Wyładowania elektryczne w gazach są zjawiskami polegającymi na przepływie prądu przez ośrodek, który w normalnych warunkach ma właściwości izolacyjne. Gaz zaczyna przewodzić dopiero wtedy, gdy w jego objętości pojawi się odpowiednia liczba swobodnych elektronów i jonów, zdolnych do ruchu w polu elektrycznym. Zjawiska te mają duże znaczenie w technice wysokich napięć, ponieważ są związane z przebiegiem izolacji, powstawaniem wyładowań częściowych oraz pracą urządzeń elektroenergetycznych w powietrzu i innych gazach [1, 2].

1.1 MECHANIZMY JONIZACJI GAZÓW ORAZ WARUNKI ZAPŁONU WYŁADOWANIA

Podstawą powstania wyładowania jest jonizacja gazu, czyli wytworzenie nośników ładunku w wyniku zderzeń elektronów z cząsteczkami ośrodka. Jeżeli pole elektryczne jest dostatecznie silne, elektrony uzyskują energię wystarczającą do wywoływania kolejnych jonizacji, co prowadzi do rozwoju lawiny elektronowej. Mechanizm ten stanowi podstawę klasycznego opisu zapłonu wyładowania w gazie według teorii Townsenda [1, 2].

Do zapłonu wyładowania konieczne są odpowiednie warunki elektryczne i geometryczne. Znaczenie mają przede wszystkim: wartość pola elektrycznego, odległość między elektrodami, ciśnienie gazu oraz obecność elektronów początkowych. Jeżeli liczba nowych elektronów powstających w procesie jonizacji jest wystarczająca do podtrzymania procesu, wyładowanie przechodzi ze stanu niesamodzielnego w samodzielny [1, 2].

1.2 RODZAJE WYŁADOWAŃ ELEKTRYCZNYCH W GAZACH

W gazach mogą występować różne formy wyładowań, zależnie od warunków pracy układu. Początkowo pojawiają się słabe wyładowania związane z lokalną jonizacją, natomiast przy wzroście natężenia pola i energii procesu może dojść do powstania wyładowania koronowego, iskrowego lub łukowego. Korona ma charakter lokalny i rozwija się zwykle w obszarach bardzo niejednorodnego pola elektrycznego, natomiast łuk elektryczny całkowicie mostkuje przestrzeń izolacyjną pomiędzy elektrodami [1, 2].

W praktyce technicznej szczególnie istotne są

wyładowania koronowe, ponieważ często stanowią wczesny etap uszkodzeń układów izolacyjnych. Występują one przy napięciu niższym niż napięcie potrzebne do pełnego przebicia szczeliny gazowej, dlatego ich obecność traktuje się jako sygnał ostrzegawczy świadczący o lokalnym przeciążeniu elektrycznym układu [1, 2].

1.3 PRAWO PASCHENA

Jednym z najważniejszych praw opisujących przebieg gazu jest prawo Paschena. Zgodnie z nim napięcie przebicia nie zależy osobno od ciśnienia gazu i odległości między elektrodami, lecz przede wszystkim od ich iloczynu $p \cdot d$. Oznacza to, że dla danego gazu i określonych elektrod można wyznaczyć zależność napięcia zapłonu od warunków geometryczno-ciśnieniowych szczeliny [1, 2, 3].

Najważniejszą cechą krzywej Paschena jest występowanie minimum. Oznacza to, że istnieje taka wartość iloczynu $p \cdot d$, dla której przebieg następuje przy najniższym napięciu. Dla mniejszych wartości iloczynu liczba zderzeń elektronów z cząsteczkami gazu jest zbyt mała, aby skutecznie rozwinąć lawinę jonizacyjną. Z kolei dla większych wartości droga swobodna elektronów staje się zbyt krótka, przez co elektrony nie osiągają energii potrzebnej do jonizacji pomiędzy kolejnymi zderzeniami [1, 2, 3].

Prawo Paschena ma bardzo duże znaczenie praktyczne, ponieważ pozwala przewidywać warunki przebicia w układach gazowych, komorach niskociśnieniowych i urządzeniach wysokiego napięcia. Jest ono szczególnie użyteczne przy doborze odległości izolacyjnych oraz przy analizie wpływu ciśnienia na wytrzymałość elektryczną powietrza. Ma to znaczenie między innymi w technice wysokonapięciowej, aparaturze próżniowej oraz w systemach pracujących na różnych wysokościach, gdzie ciśnienie otoczenia ulega zmianie [1, 2, 3].

Należy jednak zaznaczyć, że klasyczna postać prawa Paschena najlepiej opisuje przebieg w polu zbliżonym do jednorodnego i dla klasycznych zakresów szczelin oraz ciśnień. W szczególnych warunkach, zwłaszcza dla bardzo małych szczelin, bardzo niskich lub bardzo wysokich wartości $p \cdot d$, a także w polu niejednorodnym, obserwuje się odchylenia od klasycznej zależności. W takich przypadkach istotną rolę zaczynają odgrywać dodatkowe zjawiska, takie jak emisja polowa, straty elektronów czy lokalne wzmocnienie pola elektrycznego [1,2,3].

Z punktu widzenia modelowania i symulacji prawo Paschena stanowi więc podstawę opisu zapłonu wyładowania, ale jednocześnie pokazuje, że proces przebicia gazu jest zjawiskiem złożonym. Dlatego w bardziej zaawansowanych analizach stosuje się modele rozszerzone, uwzględniające zarówno teorię Townsenda, jak i wpływ geometrii układu, niejednorodności pola oraz zjawisk zachodzących przy mikroszczelinach.

1.4 WPLYW ROZKŁADU POLA ELEKTRYCZNEGO I PRZEBIEGU CZASOWEGO NA ROZWÓJ WYŁADOWAŃ

Rozkład pola elektrycznego silnie wpływa na miejsce i sposób inicjacji wyładowania. W polu niejednorodnym, szczególnie w pobliżu ostrych krawędzi lub cienkich elektrod, lokalne natężenie pola może być znacznie

większe od wartości średniej. W takich warunkach wyładowanie koronowe pojawia się wcześniej niż pełne przebicie gazu, ponieważ proces jonizacji rozwija się najpierw lokalnie, w obszarze największego wzmocnienia pola [1, 2].

Wyładowania mają również charakter dynamiczny. Mogą zaczynać się od słabej lokalnej aktywności, następnie przechodzić w bardziej intensywną formę, a w skrajnych warunkach prowadzić do pełnego przebicia lub powstania łuku elektrycznego. Z tego względu analiza wyładowań nie powinna ograniczać się jedynie do wartości napięcia zapłonu, lecz powinna uwzględniać również rozwój zjawiska w czasie oraz jego zależność od warunków pracy układu [1, 2].

2 CHARAKTERYSTYKA ŚRODOWISKA MATLAB

Środowisko MATLAB jest zaawansowaną platformą programistyczno-obliczeniową wykorzystywaną w zastosowaniach inżynierskich i naukowych. Umożliwia wykonywanie obliczeń numerycznych, analizę danych, tworzenie algorytmów oraz wizualizację wyników, dzięki czemu znajduje szerokie zastosowanie między innymi w elektrotechnice, automatyce, energetyce i przetwarzaniu sygnałów. MATLAB łączy w sobie język programowania, środowisko robocze oraz zestaw gotowych funkcji i bibliotek, co pozwala na sprawne rozwiązywanie problemów technicznych oraz matematycznych [4, 5, 6].

2.1 MATLAB

MATLAB, którego nazwa pochodzi od określenia Matrix Laboratory, jest językiem programowania i środowiskiem obliczeń numerycznych opartym głównie na operacjach macierzowych i tablicowych. Dzięki temu bardzo dobrze nadaje się do rozwiązywania zagadnień matematycznych oraz technicznych, w których istotne znaczenie mają obliczenia wektorowe, analiza zależności między parametrami i opracowanie wyników w formie graficznej. Środowisko to jest wykorzystywane zarówno do prostych zadań obliczeniowych, jak i do bardziej złożonych analiz związanych z modelowaniem zjawisk fizycznych i systemów technicznych [4, 5, 7].

Duże znaczenie ma również rozbudowana funkcjonalność programu. MATLAB oferuje narzędzia do obliczeń matematycznych, programowania, wizualizacji danych oraz współpracy z dodatkowymi pakietami przeznaczonymi do zastosowań specjalistycznych. Pozwala to na wykorzystanie go nie tylko jako kalkulatora numerycznego, ale również jako kompletnego narzędzia do budowy modeli, analizy danych pomiarowych i przygotowania wyników do dalszej interpretacji [4, 5, 7, 8].

2.2 SIMULINK

Simulink jest środowiskiem graficznym współpracującym z MATLAB-em, przeznaczonym do modelowania i symulacji układów dynamicznych z wykorzystaniem schematów blokowych. Umożliwia tworzenie modeli wielodźwzinowych przez łączenie

bloków reprezentujących źródła sygnałów, operacje matematyczne, elementy dynamiczne oraz wybrane części układu technicznego. Takie podejście upraszcza budowę modeli i pozwala na bardziej przejrzyste przedstawienie zależności między poszczególnymi elementami systemu [5, 7, 8, 9].

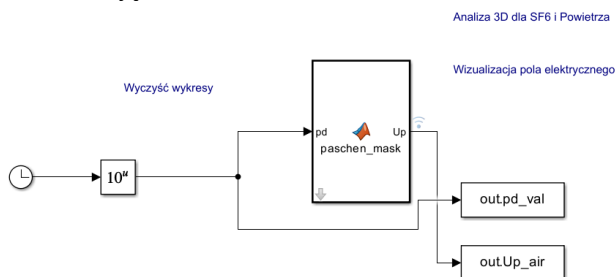
Zaletą Simulinka jest możliwość przeprowadzania symulacji jeszcze przed wykonaniem rzeczywistego układu. Pozwala to analizować przebiegi czasowe, sprawdzać wpływ zmian parametrów na działanie modelu oraz oceniać poprawność przyjętych założeń. Dzięki integracji z MATLAB-em wyniki symulacji mogą być dalej przetwarzane, porównywane i przedstawiane w formie wykresów, co czyni to środowisko szczególnie użytecznym w modelowaniu i analizie zjawisk technicznych [5, 7, 8, 9].

3 MODEL WYŁADOWAŃ WYSOKONAPIĘCIOWYCH W ŚRODOWISKU MATLAB

W ramach pracy opracowano model symulacyjny wyładowań wysokonapięciowych w gazach w środowisku MATLAB/Simulink. Model został zbudowany na podstawie prawa Paschena i umożliwia analizę napięcia przebicia w zależności od iloczynu ciśnienia i odległości międzyelektrodowej oraz wybranych parametrów środowiskowych. Zastosowanie symulacji pozwala na bezpieczne badanie zjawiska bez konieczności prowadzenia rzeczywistych prób wysokonapięciowych, które są trudne pomiarowo i wymagają specjalistycznej aparatury. Opracowany model umożliwia również porównanie wpływu rodzaju gazu, geometrii elektrod, temperatury oraz wilgotności na warunki powstawania wyładowania.

3.1 WYGLĄD MODELU

Na rys. 1. przedstawiono główny schemat modelu symulacyjnego opracowanego w środowisku Simulink. Sygnał wejściowy generowany przez blok zegara i funkcję 10^4 jest przekazywany do bloku „paschen_mask”, w którym wyznaczane jest napięcie przebicia na podstawie przyjętych parametrów modelu. Otrzymane wyniki są następnie zapisywane w blokach „out.pd_val” oraz „out.Up_air”, co umożliwia ich dalszą analizę i wizualizację.

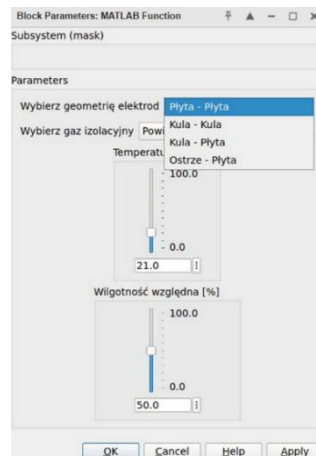


Rys. 1. Schemat głównego bloku symulacji [oprac. własne]

3.2 OPIS SYMULACJI

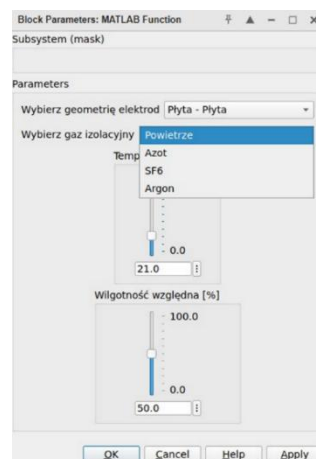
Model został zaprojektowany z myślą o wygodzie użytkownika oraz przejrzystości obsługi. Zmiana parametrów symulacji odbywa się za pomocą intuicyjnej

maski w formie okna dialogowego (rys. 2.), dzięki czemu nie ma potrzeby ingerowania bezpośrednio w kod programu. Takie rozwiązanie pozwala użytkownikowi skupić się na analizie zjawiska fizycznego oraz interpretacji wyników symulacji.



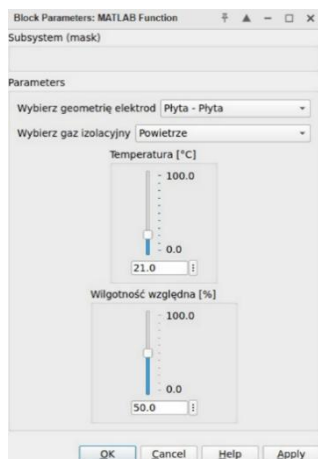
Rys. 2. Okno dialogowe wprowadzania parametrów – wybór geometrii elektrod [oprac. własne]

Na rys. 2. przedstawiono okno dialogowe umożliwiające wybór geometrii elektrod zastosowanej w modelu. Dostępne konfiguracje pozwalają analizować wpływ kształtu elektrod na rozkład pola elektrycznego oraz warunki inicjacji wyładowania. Do wyboru są następujące konfiguracje elektrod: płyta-płyta, kula-kula, ostrze-ostrze, kula-płyta oraz ostrze-płyta.



Rys. 3. Okno dialogowe wprowadzania parametrów – wybór gazu izolacyjnego [oprac. własne]

Na rys. 3. przedstawiono okno dialogowe umożliwiające wybór gazu izolacyjnego wykorzystywanego w symulacji. Użytkownik może wybrać jeden z kilku dostępnych gazów, co pozwala analizować ich wpływ na wartość napięcia przebicia. Do wyboru są następujące gazy: powietrze, azot, SF₆ (Heksafluorek siarki) oraz argon.

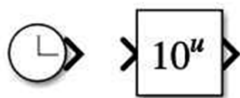


Rys. 4. Okno dialogowe wprowadzania parametrów – wybór temperatury oraz wilgotności względnej [oprac. własne]

Na rys. 4. przedstawiono główne okno dialogowe służące do ustawiania parametrów symulacji. Użytkownik może wybrać geometrię elektrod, rodzaj gazu izolacyjnego oraz określić wartości temperatury i wilgotności względnej, które są uwzględniane w obliczeniach modelu.

Zastosowanie takiego okna parametrów sprawia, że model jest prosty i wygodny w obsłudze, a zmiana warunków symulacji może być wykonywana szybko, bez konieczności modyfikowania kodu programu.

3.3 ELEMENTY SYMULOWANEGO MODELU



Rys. 5. Blok zegara i funkcji matematycznej [oprac. własne]

Blok „Clock” oraz blok funkcji matematycznej 10^u (rys. 5.) służą do generowania sygnału wejściowego reprezentującego parametr $p \cdot d$. Zastosowanie bloku potęgowania pozwala na uzyskanie skali logarytmicznej, co jest niezbędne do poprawnego zobrazowania krzywej Paschena w szerokim zakresie wartości.



Rys. 6. Blok „MATLAB Function” [oprac. własne]

Blok „MATLAB Function” stanowi główny algorytm obliczeniowy modelu. Funkcja przyjmuje sygnał $p \cdot d$ generowany za pomocą bloków „Clock” i 10^u oraz cztery parametry zadawane z maski bloku: rodzaj gazu, geometrię elektrod, temperaturę oraz wilgotność. Wewnątrz bloku realizowane są obliczenia napięcia przebicia na podstawie zależności wynikającej z prawa Paschena, rozszerzonej o współczynniki korekcyjne uwzględniające warunki pracy modelu.

Wewnątrz bloku znajduje się algorytm opisany zależnością:

$$U_p = \frac{B \cdot (p \cdot d)_{eff}}{\ln(A \cdot (p \cdot d)_{eff}) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \cdot k_g \cdot k_h$$

gdzie:

A i B – stałe dobierane automatycznie w zależności od wybranego gazu,

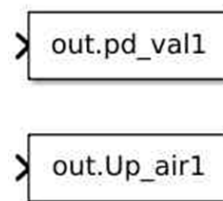
$(p \cdot d)_{eff}$ – skorygowana wartość iloczynu ciśnienia i odległości międzyelektrodowej, uwzględniająca wpływ temperatury na gęstość ośrodka,

Γ – współczynnik emisji wtórnej,

k_g – współczynnik geometrii elektrod, odpowiadający za niejednorodność pola elektrycznego,

k_h – współczynnik korekcyjny uwzględniający wpływ wilgotności.

Przedstawiony wzór (1) służy do wyznaczania napięcia przebicia gazu w zadanych warunkach pracy modelu. Jego podstawę stanowi prawo Paschena, zgodnie z którym napięcie zapłonu wyładowania zależy od iloczynu ciśnienia gazu i odległości pomiędzy elektrodami. W opracowanym modelu klasyczna zależność została rozszerzona o korekty związane z temperaturą, wilgotnością oraz geometrią elektrod, dzięki czemu możliwe jest bardziej realistyczne odwzorowanie warunków inicjacji wyładowania elektrycznego. Tak zapisany wzór stanowi podstawę działania głównego bloku obliczeniowego, w którym dla kolejnych wartości parametru $p \cdot d$ wyznaczane jest teoretyczne napięcie przebicia.



Rys. 7. Bloki „To Workspace” [oprac. własne]

Bloki „To Workspace” są blokami zapisu danych, które stanowią pomost między środowiskiem graficznym Simulinka a wierszem poleceń programu MATLAB. Blok „pd_val” zapisuje wartości iloczynu $p \cdot d$ generowane w każdym kroku symulacji, natomiast blok „Up_air” zapisuje obliczone napięcie przeskoku. Dzięki temu możliwe jest dalsze opracowanie wyników, ich analiza oraz automatyczne tworzenie wykresów po zakończeniu symulacji.

3.4 ZASADA DZIAŁANIA

Po uruchomieniu modelu blok „Clock” generuje sygnał czasu, który narasta liniowo w zadanym przedziale. Sygnał ten stanowi punkt wyjścia do dalszych obliczeń i pełni funkcję osi odniesienia dla kolejnych etapów symulacji. Następnie trafia on do bloku funkcji matematycznej 10^u , gdzie zostaje przekształcony do postaci wykładniczej. Operacja ta umożliwia uzyskanie szerokiego zakresu wartości parametru $p \cdot d$, co jest konieczne do analizy krzywej Paschena w skali logarytmicznej.

Wyznaczona wartość $p \cdot d$ przekazywana jest do bloku „MATLAB Function”, który stanowi główną część obliczeniową modelu. Równocześnie blok ten odczytuje parametry zadane przez użytkownika, takie jak rodzaj gazu, geometria elektrod, temperatura oraz wilgotność. Na tej podstawie dobierane są odpowiednie stałe oraz współczynniki korekcyjne. Wewnątrz bloku wartość $p \cdot d$ jest korygowana z uwzględnieniem wpływu temperatury, a następnie na podstawie zmodyfikowanego wzoru Paschena wyznaczane jest napięcie przebicia.

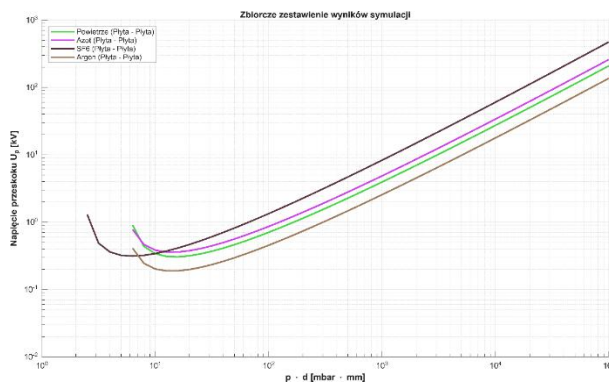
Obliczone napięcie przebicia U_p oraz odpowiadająca mu wartość $p \cdot d$ są następnie zapisywane za pomocą bloków „To Workspace” o nazwach „pd_val” oraz „Up_air”. Dane są gromadzone w czasie trwania symulacji w środowisku MATLAB, co umożliwia ich późniejsze przetwarzanie. Po zakończeniu symulacji automatycznie uruchamiany jest skrypt przypisany do funkcji „StopFcn”, który odczytuje zapisane dane i generuje wykres przedstawiający krzywą Paschena, gotowy do dalszej analizy.

4 ANALIZA WYBRANYCH WYNIKÓW

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę wybranych wyników uzyskanych na podstawie opracowanego modelu symulacyjnego. Ocenie poddano zarówno charakterystyki napięcia przeskoku w funkcji parametru $p \cdot d$, jak i rozkład pola elektrycznego dla różnych geometrii elektrod. Przedstawione wyniki pozwalają określić wpływ rodzaju gazu oraz konfiguracji układu elektrod na warunki inicjacji wyładowania wysokonapięciowego.

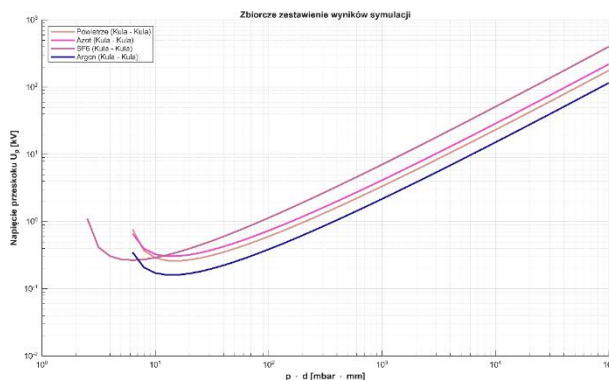
4.1 OTRZYMANE CHARAKTERYSTYKI NAPIĘCIA PRZESKOKU W FUNKCJI

Dla układu elektrod płyta–płyta uzyskano klasyczne krzywe Paschena (rys. 8.) o wyraźnie zaznaczonym minimum napięcia przeskoku. W całym analizowanym zakresie najwyższe wartości napięcia przebicia osiąga SF_6 , natomiast najniższe argon. Otrzymane przebiegi wskazują, że w polu jednorodnym różnice pomiędzy gazami są czytelne i dobrze widoczne na całym zakresie zmian parametru $p \cdot d$.



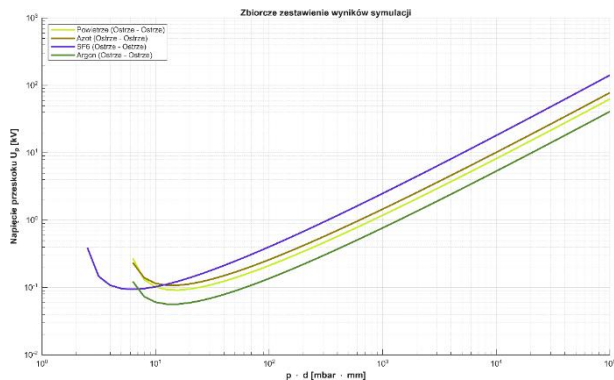
Rys. 8. Zestawienie wyników symulacji krzywych Paschena dla powietrza, azotu, SF_6 oraz argonu w układzie elektrod płyta-płyta [oprac. własne]

W układzie kula–kula wszystkie analizowane gazy również wykazują charakterystyczny przebieg krzywej Paschena (rys. 9.) z minimum napięcia przeskoku. Najwyższą wytrzymałością elektryczną charakteryzuje się SF_6 , natomiast najniższą argon. W porównaniu z układem płyta–płyta widoczny jest wpływ geometrii elektrod na poziom napięcia oraz kształt poszczególnych przebiegów.



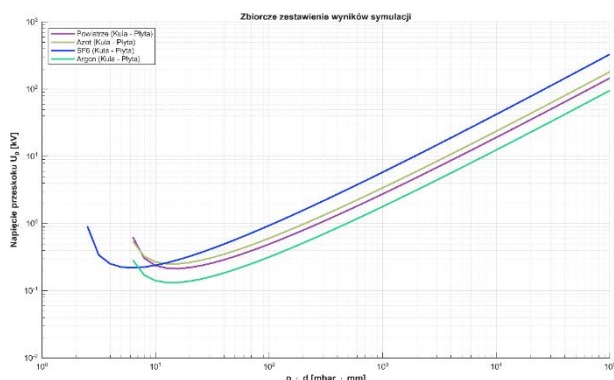
Rys. 9. Zestawienie wyników symulacji krzywych Paschena dla powietrza, azotu, SF_6 oraz argonu w układzie elektrod kula-kula [oprac. własne]

Dla konfiguracji ostrze–ostrze otrzymano krzywe (rys. 10.) o podobnym ogólnym charakterze, jednak przy niższych wartościach napięcia przeskoku niż w bardziej jednorodnych układach elektrod. Także w tym przypadku najwyższe napięcie przebicia osiąga SF_6 , a najniższe argon. Wyniki te potwierdzają, że silna niejednorodność pola wpływa na obniżenie napięcia inicjacji wyładowania.



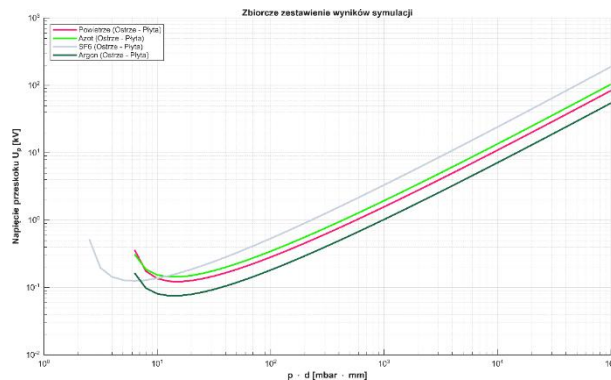
Rys. 10. Zestawienie wyników symulacji krzywych Paschena dla powietrza, azotu, SF₆ oraz argonu w układzie elektrod ostrze-ostrze [oprac. własne]

W układzie kula-płyta przebiegi napięcia przeskoku (rys. 11.) zachowują charakterystyczną postać krzywej Paschena, z wyraźnym minimum oraz wzrostem napięcia dla większych wartości $p \cdot d$. Najwyższe wartości napięcia uzyskano dla SF₆, natomiast najniższe dla argonu. Układ ten stanowi przypadek pola słabo niejednorodnego, dlatego otrzymane wyniki mają charakter pośredni między układami jednorodnymi i silnie niejednorodnymi.



Rys. 11. Zestawienie wyników symulacji krzywych Paschena dla powietrza, azotu, SF₆ oraz argonu w układzie elektrod kula-płyta [oprac. własne]

Dla układu ostrze-płyta uzyskano najniższe poziomy napięcia przeskoku (rys. 12.) spośród konfiguracji o wyraźnie niejednorodnym polu. Wszystkie przebiegi zachowują typowy kształt krzywej Paschena, jednak bardziej widoczny jest wpływ geometrii na obniżenie napięcia przebicia. Podobnie jak w pozostałych przypadkach najwyższą wytrzymałość elektryczną wykazuje SF₆, a najniższą argon.



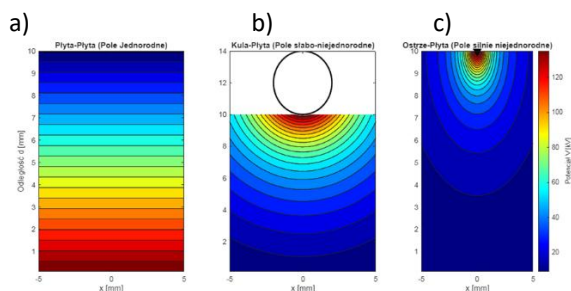
Rys. 12. Zestawienie wyników symulacji krzywych Paschena dla powietrza, azotu, SF₆ oraz argonu w układzie elektrod ostrze-płyta [oprac. własne]

Analiza wszystkich przedstawionych wykresów wskazuje, że niezależnie od geometrii elektrod uzyskano typowy przebieg krzywej Paschena, z wyraźnym minimum napięcia przeskoku. We wszystkich konfiguracjach najwyższe wartości napięcia przebicia osiąga SF₆, co potwierdza jego bardzo dobre właściwości izolacyjne, natomiast najniższe wartości uzyskano dla argonu. Widoczny jest również istotny wpływ geometrii elektrod na poziom napięcia przeskoku — wraz ze wzrostem niejednorodności pola elektrycznego napięcie inicjacji wyładowania ulega obniżeniu.

4.2 ROZKŁAD POLA

Przedstawione wykresy na rys. 13. ilustrują rozkład potencjału elektrycznego dla trzech różnych geometrii elektrod: płyta-płyta, kula-płyta oraz ostrze-płyta. W układzie płyta-płyta (rys. 13a) linie ekwipotencjalne są proste, równoległe i rozmieszczone równomiernie, co oznacza, że pole elektryczne ma charakter jednorodny. Jest to najbardziej uporządkowany przypadek, w którym zmiana potencjału zachodzi w sposób regularny na całej powierzchni między elektrodami. Taki rozkład wskazuje na brak lokalnych koncentracji pola elektrycznego.

W konfiguracji kula-płyta (rys. 13b) linie ekwipotencjalne zagęszczają się pod kulą, co wskazuje na lokalne zwiększenie natężenia pola i świadczy o polu słabo niejednorodnym. Jeszcze silniejszy efekt widoczny jest w układzie ostrze-płyta (rys. 13c), gdzie bardzo duże skupienie linii występuje przy końcówce ostrza, co oznacza pole silnie niejednorodne. Wraz z oddalaniem się od tych obszarów rozkład potencjału staje się bardziej rozproszony. Z porównania wszystkich trzech przypadków wynika więc, że wraz ze wzrostem nieregularności kształtu elektrody rośnie również niejednorodność pola elektrycznego.



Rys. 13. Wykresy ilustrujące rozkład potencjału elektrycznego dla trzech różnych geometrii elektrod – a) płyta-płyta; b) kula-płyta; c) ostrze-płyta [oprac. własne]

WNIOSKI

Opracowany model stanowi użyteczne narzędzie do szybkiej analizy napięcia przebicia dla różnych gazów, geometrii elektrod oraz warunków otoczenia, bez konieczności wykonywania rzeczywistych prób wysokonapięciowych. Jego istotną zaletą jest przejrzysta budowa oraz wygodna obsługa, ponieważ zmiana parametrów odbywa się z poziomu maski bloku, bez potrzeby ingerowania w kod programu. Model umożliwia automatyczne generowanie krzywych Paschena, zapisywanie danych wyjściowych oraz porównywanie wielu przebiegów na wspólnych wykresach, co znacznie ułatwia analizę wyników. Dodatkowym atutem jest uwzględnienie wpływu temperatury, wilgotności i geometrii elektrod, dzięki czemu model nie ogranicza się wyłącznie do idealnych warunków teoretycznych, ale pozwala lepiej odwzorować rzeczywiste warunki pracy układów wysokonapięciowych.

Należy jednak zaznaczyć, że model ma charakter uproszczony, ponieważ opiera się głównie na prawie Paschena i współczynnikach korekcyjnych, przez co nie odwzorowuje wszystkich zjawisk fizycznych towarzyszących rzeczywistemu rozwojowi wyładowania. Nie uwzględnia on w pełni zjawisk przejściowych, szczegółowej dynamiki plazmy ani bardziej złożonych procesów zachodzących w silnie niejednorodnym polu elektrycznym, dlatego powinien być traktowany przede wszystkim jako narzędzie do analizy wstępnej, porównawczej i dydaktycznej. Mimo tego model posiada wyraźny potencjał rozwojowy, ponieważ może zostać rozszerzony o dokładniejsze zależności fizyczne, dodatkowe konfiguracje elektrod, szerszy zakres gazów oraz porównanie wyników symulacyjnych z danymi eksperymentalnymi. W przyszłości takie rozwinięcie mogłoby zwiększyć jego wartość nie tylko dydaktyczną, ale również projektową, wspierając wstępny dobór parametrów rzeczywistych układów izolacyjnych i urządzeń wysokiego napięcia.

MODEL OF HIGH-VOLTAGE DISCHARGES CONSIDERING VARIABLE GAS PARAMETERS AND ELECTRODE SYSTEM

This paper concerns the modeling and simulation of high-voltage discharges in gases using the MATLAB/Simulink environment. The aim of the study was to develop a model enabling the analysis of breakdown voltage as a function of the product of pressure and interelectrode distance $p \cdot d$, based on Paschen's law. The model takes into account the influence of gas type, electrode geometry, and selected environmental parameters such as temperature and humidity. The simulations made it possible to determine breakdown voltage characteristics for different system configurations and to compare the influence of individual factors on the conditions of discharge initiation. In addition, the electric field distribution was analyzed for selected electrode geometries, showing the effect of field non-uniformity on local potential concentration and the reduction of breakdown voltage. The obtained results confirmed the usefulness of the MATLAB/Simulink environment for analyzing phenomena related to electrical breakdown in gases and for the preliminary assessment of high-voltage system parameters.

Key words: Electrical discharges, breakdown voltage, Paschen's law, MATLAB, electric field

BIBLIOGRAFIA

- [1] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. V red., Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [2] Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J., High Voltage Engineering: Fundamentals. II red., Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.
- [3] Florkowska B., Technika wysokich napięć. Materiały do wykładów i laboratorium. Wydawnictwo AGH, Kraków 1988. Skrypty Uczelniane nr 1142.
- [4] MathWorks, MATLAB. Dostęp online: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> [dostęp: 30.03.2026].
- [5] Klempka R., Stankiewicz A., Modelowanie i symulacja układów dynamicznych. AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.
- [6] MathWorks, MATLAB Documentation. Dostęp online: <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html> [dostęp: 30.03.2026].
- [7] Klempka R., Świątek B., Programowanie, algorytmy numeryczne i modelowanie w Matlabie. AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2017.
- [8] Serafin E., Krawczyk G., Systemy informatyczne w elektroenergetyce. Wydawnictwo UTH Radom, Radom 2015.
- [9] MathWorks, Simulink Documentation. Dostęp online: <https://www.mathworks.com/help/simulink/index.html> [dostęp: 30.03.2026].

