

**Politechnika Opolska**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki



**POLITECHNIKA**  
OPOLSKA

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Eksperymentalne badania procesu generowania siły  
elektroadhezyjnej w kontekście zmiennych parametrów pracy  
padów**

mgr inż. Wiktoria Kalus

PROMOTOR:

dr hab. inż. Jarosław Zygarlicki, prof. Uczelni

PROMOTOR POMOCNICZY:

dr inż. Łukasz Nagi

Opole 2023 r.

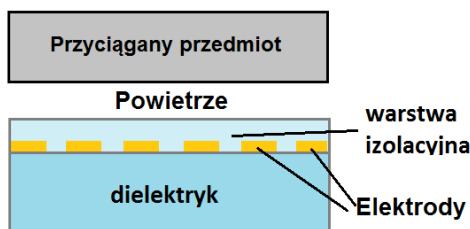
## Spis treści

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Wstęp.....   | 3  |
| 1.1 | Motywacje badawcze .....                             | 5  |
| 1.1 | Cel i teza pracy.....                                | 5  |
| 2   | Wprowadzenie teoretyczne do elektroadhezji.....      | 6  |
| 2.1 | Czynniki wpływające na wartość generowanej siły..... | 6  |
| 2.2 | Budowa i rodzaje padów elektroadhezyjnych.....       | 8  |
| 3   | Badania eksperymentalne.....                         | 10 |
| 3.1 | Zautomatyzowane pomiary siły elektroadhezyjnej.....  | 10 |
| 3.2 | Podsumowanie badań.....                              | 15 |
| 4   | Symulacje komputerowe .....                          | 16 |
| 4.1 | Pady koplarnie.....                                  | 16 |
| 4.2 | Pady niekoplarnie.....                               | 19 |
| 4.3 | Podsumowanie symulacji.....                          | 21 |
| 5   | Bezpieczeństwo elektryczne i toksykologiczne .....   | 22 |
| 5.1 | Struktury nanowęglowe oraz gazy ochronne .....       | 22 |
| 5.2 | Problem generowania ozonu .....                      | 25 |
| 5.3 | Podsumowanie rozdziału .....                         | 27 |
| 6   | Podsumowanie.....                                    | 28 |
|     | Bibliografia .....                                   | 29 |
|     | Spis publikacji autorki.....                         | 32 |
|     | Patenty.....   | 33 |

# 1 Wstęp

Elektroadhezja jest fizycznym zjawiskiem przyciągania międzycząsteczkowego dwóch ciał stałych w wyniku powstawania między innymi pola elektrostatycznego [1]. Elektroadhezja wykorzystuje inżynierjno - techniczne dziedziny nauki obejmując: elektronikę [2] [3], elektrotechnikę, automatykę [4] [5] [6] oraz informatykę. Elektroadhezja to również dziedzina nauk fizycznych [7] [8] [9] [10] [11], w których pojawiają się elementy pola elektrostatycznego, polaryzacja materiałów oraz materiałoznawstwo - w tym wiedza na temat dielektryków niezbędnych do funkcjonowania padów elektroadhezyjnych.

Do generowania siły elektroadhezyjnej stosuje się pad elektroadhezyjny, najczęściej w postaci płytki o dużej przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_r$  (zwanej też względną przenikalnością elektryczną mierzoną w Faradach na metr [F/m]), na której znajdują się zazwyczaj dwie elektrody przewodzące prąd. Pad elektroadhezyjny zasilany jest wysokim napięciem wytwarzającym pole elektryczne o natężeniu najczęściej kilku kilowoltów na metr [kV/m]. Przekrój przykładowego pada elektroadhezyjnego przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Przekrój pada elektroadhezyjnego

Elektroadhezja jest zaawansowaną, w pełni kontrolowaną, a przede wszystkim odwracalną technologią adhezyjną (klejenia), dzięki której można przyciągać oraz chwycić przedmioty. System elektroadhezyjny składa się z kilku podstawowych elementów:

- pada elektroadhezyjnego wykonanego z dielektrycznego materiału (na przykład płytki PCB - Printed Circuit Board), na którym znajdują się dwie elektrody przewodzące (na przykład miedziane),
- podłoża (materiału), do którego może przylegać pad elektroadhezyjny,
- źródła wysokiego napięcia,
- układu sterowania systemem elektroadhezyjnym.

Elektroadhezja jest zjawiskiem wykorzystywanym w wielu branżach. Obejmuje ona różne obszary działalności ludzkiej, między innymi przemysł, rolnictwo oraz kosmonautykę. W literaturze opisywane są następujące przypadki zastosowań padów elektroadhezyjnych jako:

- elektrostatyczne uchwyty do mocowania przedmiotów [12],
- metody klejenia w przypadku misji kosmicznych, do przenoszenia i chwytania materiałów [2] [13],
- elektrostatyczne uchwyty do przenoszenia i chwytania materiałów w przemyśle półprzewodnikowym [14],
- końcówki głowic do chwytania zaawansowanych kompozytów oraz materiałów włóknistych, takich jak tkaniny [15] oraz włókna węglowe [16] [17],
- mechanizm adhezyjny do wspinaczki robotów [4] [5] [6],
- urządzenia do przenoszenia materiałów dla zautomatyzowania produkcji magazynów [18].

Tak szerokie zastosowanie elektroadhezji wynika z tego, że w porównaniu z innymi technologiami adhezyjnymi [19] wyróżniają ją cztery zalety, takie jak:

- zwiększone możliwości adaptacyjne, ponieważ przylega zarówno do materiałów przewodzących, jak i izolacyjnych, takich jak aluminium i powierzchnie betonowe [3],
- przyczepność do różnego rodzaju powierzchni, zarówno gładkich, chropowatych oraz przepuszczających powietrze w odróżnieniu od metody z wykorzystaniem przyssawek (elektroadhezja może być stosowana w warunkach próżni, a takie środowiska próżniowe są coraz częściej pożądane przez producentów chipów oraz układów scalonych) [20],
- stosunkowo lekki układ elektroadhezyjny, który posiada zmniejszoną złożoność systemów pod względem sterowania i struktury mechanicznej oraz umożliwia elektryczne przyciąganie i odpychanie, w związku z tym nie wymaga użycia silników lub pomp,
- niskie zużycie energii elektrycznej rzędu pojedynczych watów [21]. Ta zaleta pozwala na zmniejszenie energii zużywanej w aplikacjach typu „podnieś i połóż” [18] [22].

## **1.1 Motywacje badawcze**

Motywacją badawczą niniejszej pracy było przeanalizowanie problemów wynikających z zastosowania elektroadhezji i urządzeń wytwarzających siły elektroadhezyjne w przemyśle. Zwrócono uwagę na konstrukcję pada elektroadhezyjnego oraz wybór materiału dielektrycznego, a także optymalizację układu zasilającego [23], włącznie z algorytmami sterowania napięciem zasilającym pad. Niewłaściwy dobór konstrukcji pada elektroadhezyjnego, czy też materiału dielektrycznego, z którego będzie wykonany pad prowadzi do wyładowań elektrycznych, takich jak wyładowania koronowe [24], co w konsekwencji może spowodować uszkodzenia systemu elektroadhezyjnego lub porażenia prądem elektrycznym. W trakcie wyładowań elektrycznych, dochodzi również do jonizacji powietrza oraz do generowania ozonu, który może być niebezpieczny dla personelu obsługującego urządzenia wykorzystujące elektroadhezję.

Badania przeprowadzone w niniejszej pracy motywowane są bezpieczeństwem, które może być zapewnione przez modernizację układu zasilającego, algorytmów sterowania napięciem oraz odpowiednią konstrukcją pada elektroadhezyjnego. Te działania doprowadzą do minimalizacji zjawisk wyładowań elektrycznych występujących na padzie. Konsekwencją przeprowadzonych badań będzie zwiększone bezpieczeństwo działania systemu elektroadhezyjnego: od strony elektrycznej, poprzez ograniczenie możliwości porażenia prądem elektrycznym oraz od strony chemicznej, dzięki minimalizacji zjawiska wytwarzania się szkodliwego w dużych stężeniach ozonu.

### **1.1 Cel i teza pracy**

W celu zbadania zjawiska elektroadhezji zweryfikowano oraz przeanalizowano problemy powstające podczas wytwarzania się siły elektroadhezyjnej. Zbadano poszczególne parametry wpływające na wartość generowanej siły elektroadhezyjnej oraz zaproponowano koncepcję budowy elementów składowych systemu wytwarzania tej siły, z doбором odpowiednich materiałów przewodzących oraz dielektrycznych. Głównym celem jest analiza warunków powstawania opisanego zjawiska oraz opis metod i układów pozwalających na skuteczne wykorzystanie go w praktyce.

Główne cele badawcze pracy:

- identyfikacja czynników wpływających na wartość generowanej siły elektroadhezyjnej,
- zbadanie zależności pomiędzy siłą elektroadhezyjną a geometrią pada elektroadhezyjnego,
- propozycja rozwiązań technicznych poprawiających bezpieczeństwo użytkownika systemu,
- badania symulacyjne w środowisku ANSYS, weryfikujące oraz rozszerzające zakres przeprowadzonych eksperymentów,
- zaprojektowanie i wykonanie zestawu padów elektroadhezyjnych z uwzględnieniem geometrii i odległości elektrod oraz doboru materiału dielektrycznego, z którego wykonana jest podstawa pada,
- zbadanie wpływu struktury powierzchni przyciąganego materiału na wartość generowanej siły elektroadhezyjnej.

W niniejszej rozprawie doktorskiej postawiono następującą tezę:

„Dobór sposobu budowy padów elektroadhezyjnych oraz materiałów elementów konstrukcyjnych systemu elektroadhezyjnego, przy modyfikacji algorytmu sterowania napięciem zasilania padów, pozwala zapewnić bezpieczeństwo elektryczne oraz toksykologiczne pracy personelu obsługującego system, przy zachowaniu jego istotnych parametrów użytkowych takich jak wartość generowanej siły elektroadhezyjnej, czy całkowite gabaryty urządzenia”.

## **2 Wprowadzenie teoretyczne do elektroadhezji**

### **2.1 Czynniki wpływające na wartość generowanej siły**

Elektroadhezja jest zjawiskiem między innymi przyciągania elektrostatycznego, na które wpływa ponad trzydzieści różnych parametrów. Efekt przyciągania, którego źródłem jest siła elektroadhezyjna, możliwa do uzyskania pomiędzy padem elektroadhezyjnym a podłożem (przyciąganym materiałem) można opisać na podstawie literatury [25], gdzie sporządzono listę przedstawiającą trzydzieści trzy zmienne, które są istotne do uzyskania siły elektroadhezyjnej między padem a przyciąganym podłożem

[25]. Wyodrębnia się pięć podstawowych grup parametrów wpływających na siłę elektroadhezyjną. Do głównych czynników wpływających na elektroadhezyję należą:

- czynniki środowiskowe, czyli wpływ temperatury otoczenia [26], wilgotności [27] ciśnienia panującego w pomieszczeniu [28] lub na otwartej przestrzeni oraz wpływ zanieczyszczenia powietrza,
- parametry elektrod umieszczonych na padzie elektroadhezyjnym (istotna jest wielkość pada oraz wzór elektrody, szerokość i przestrzeń między elektrodami [29], grubość, przewodność, konduktywność i precyzyjność wykonania elektrody [30],
- parametry dielektryczne [31] pada takie jak rezystywność dielektryczna, wytrzymałość dielektryczna, struktura powierzchni, współczynnik dyssypacji, struktura molekularna dielektryka, polaryzacja, krystaliczność oraz elektrożywotność i elektronegatywność dielektryka, z którego jest wykonany pad [32] [33] [34],
- parametry podłoża (przyciąganego materiału), czyli jego rezystywność, przenikalność i wytrzymałość dielektryczna [21] [23], grubość, struktura powierzchni [25], szczeliny powietrzne, struktura molekularna, masa, krystaliczność, zdolność do polaryzacji oraz elektronegatywność i elektropozytywność [35],
- parametry elektryczne [7] [28], czyli polaryzacja napięcia (dodatnie, ujemne lub brak polaryzacji) zasilająca pad elektroadhezyjny, wielkości napięć i ich rodzaj (prąd stały lub przemienny) [26].

Oprócz wymienionych zmiennych, które mogą mieć wpływ na elektroadhezyję należy również zbadać inne istotne czynniki. Jeśli stosowane jest napięcie przemiennie częstotliwość może mieć wpływ na siłę [25]. Ponadto niektóre właściwości dielektryczne również mogą mieć wpływ na elektroadhezyję. Zasady generowania siły elektroadhezyjnej na izolowanych elektrodach mogą być różne, ponieważ część z nich oparta jest na indukcji elektrycznej, natomiast inne głównie na polaryzacji elektrycznej [6].

Pad elektroadhezyjny powinien być wykonany ze stałego materiału dielektrycznego. Niestety ulega on łatwemu uszkodzeniu mechanicznemu w momencie przebiecia elektrycznego podczas, gdy dielektryki ciekłe lub gazowe utrzymują swoje właściwości dielektryczne.

Aby odpowiednio dobrać dielektryk, jako pad elektroadhezyjny wymagane są pewne cechy:

- wysoka wytrzymałość dielektryczna w celu uniknięcia przebić,
- elastyczność (by zwiększyć solidność materiału oraz lepiej dostosować się do przyciąganej powierzchni),
- większa (wystarczająco duża) przenikalność dielektryczna (żeby zwiększyć siły elektroadhezyjne).

## 2.2 Budowa i rodzaje padów elektroadhezyjnych

Do wytworzenia siły elektroadhezyjnej wykorzystuje się tak zwany pad elektroadhezyjny. Poprzez wytwarzanie silnego pola elektrycznego indukującego ładunki na powierzchni elektrod pada powstaje siła elektrostatycznej adhezji pomiędzy padem a przyciąganym materiałem. Materiały, z jakich wytworzone są komponenty pada elektroadhezyjnego muszą odznaczać się odpowiednią wytrzymałością na przebicia elektryczne. Pad elektroadhezyjny powinien być dielektrykiem, w swojej strukturze pozbawionym pęcherzyków powietrza, w celu uniknięcia wyładowań elektrycznych na jego powierzchni oraz wewnątrz dielektryka. Elektrody umieszczone na dielektryku muszą być precyzyjnie wykonane i pozbawione ostrych krawędzi, na których może dojść do wyładowań koronowych podczas jonizacji powietrza [24]. Natomiast w miejscach zagięcia elektrod ładunki kumulują się, co w rezultacie może prowadzić do powstania większej siły przyciągającej na załamaniach elektrod.

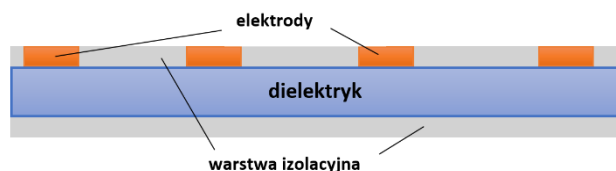
Rozróżniamy pady o elastycznej budowie [3] [36] oraz wykonane ze sztywnego materiału [2] [37]. Projektowanie padów obejmuje opracowanie konfiguracji elektrod, dobór materiału z jakiego będą wykonane elektrody, dobór materiału dielektrycznego, na którym będą umieszczone elektrody, geometrię pada oraz określenie rodzaju materiału (przyciąganego), do którego jest dedykowany pad. Polaryzacja elektrod umieszczonych na padzie może być:

- unipolarna – gdy używana jest tylko jedna elektroda i jeden konwerter wysokiego napięcia,
- bipolarna – gdy wykorzystuje się dwie elektrody i dwa konwertery wysokiego napięcia,



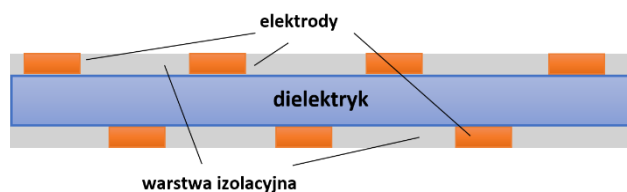
- tripolarne – gdy zastosowane są trzy elektrody oraz trzy konwertery wysokiego napięcia.

W literaturze [34] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] spotykamy się z różnymi koncepcjami ułożenia (przeważnie miedzianych) elektrod na padach elektroadhezyjnych. Większość padów posiada koplarny układ elektrod, czyli taki w którym elektrody leżą w tej samej płaszczyźnie [2] [3] [14] [36]. Pomędzy elektrodami zazwyczaj występuje powłoka izolacyjna, aby zmniejszyć ryzyko występowania przebiegów elektrycznych. Na rysunku 2.1 przedstawiono przekrój pada elektroadhezyjnego z koplarnym układem elektrod.



*Rys. 2.1. Pad elektroadhezyjny z koplarnym układem elektrod*

Odmienną koncepcją jest stosowanie elektrod znajdujących się po dwóch stronach płytki. Taki układ elektrod nazywamy niekoplarnym. Zastosowanie zbyt grubej warstwy dielektrycznej pomiędzy elektrodami (górną oraz dolną) spowoduje większą izolację chroniącą przed przebiciami, która jednak może doprowadzić do wytworzenia się mniejszego pola elektrostatycznego. Przekrój pada z niekoplarnym układem elektrod przedstawiono na rysunku 2.2.



*Rys. 2.2. Pad elektroadhezyjny z niekoplarnym układem elektrod*

Poza koplarnym i niekoplarnym układem elektrod w konstrukcji padów istotne są kształty ułożenia elektrod na padzie. W wielu pracach [23] [39] [40] [42] dyskutowano nad najlepszym rozwiązaniem i konfiguracją tych elektrod. Sprawdzone, jaka grubość elektrod będzie najodpowiedniejsza oraz jaka minimalna odległość między nimi pozwoli uniknąć występowania przebiegów elektrycznych po podłączeniu wysokiego napięcia.

### **3 Badania eksperymentalne**

Opisane eksperymenty przedstawiają ewolucję padów elektroadhezyjnych używanych podczas badań, układów zasilających oraz sposoby badania siły elektroadhezyjnej. W każdym z tych badań opisano, z jakich urządzeń składał się układ pomiarowy oraz jakie parametry padów zostały użyte podczas eksperymentów. Przeprowadzono szereg badań i eksperymentów mających na celu:

- wygenerowanie siły elektroadhezyjnej – wykonanie pada elektroadhezyjnego oraz układu, który będzie go zasilał,
- ujednoczenie warunków powstawania elektroadhezji – ustalenie parametrów wpływających na jej rozkład i siłę, ustalenie materiału, z jakiego są wykonane pady, dobór wielkości i kształtów elektrod, rodzaju powłok izolacyjnych oraz zbudowanie odpowiedniego układu zasilającego pad elektroadhezyjny,
- wykonanie pomiarów – ustalenie najlepszej metody do zbadania siły elektroadhezyjnej, zbudowanie układu pomiarowego lub wykorzystanie gotowych urządzeń w celu zbadania, jaki potencjał jest w sile elektroadhezyjnej i jakie daje ona możliwości.

#### **3.1 Zautomatyzowane pomiary siły elektroadhezyjnej**

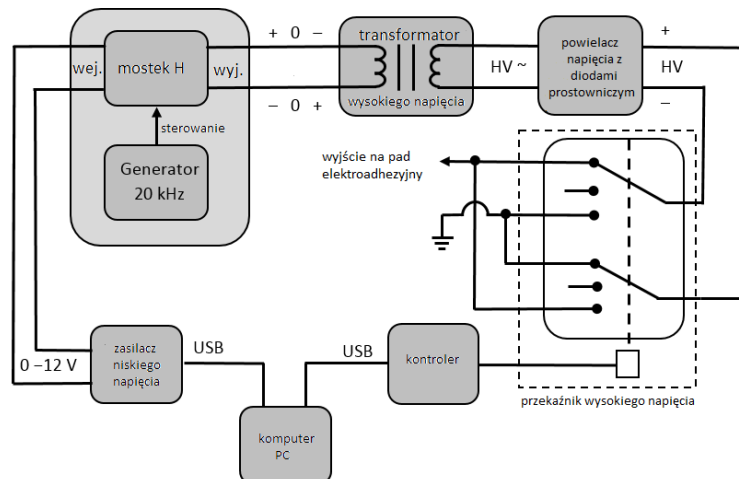
Jednym z przeprowadzonych eksperymentów było zbadanie możliwości zwiększenia siły elektroadhezyjnej w zależności od polaryzacji oraz parametrów zasilania układu. Przygotowany układ pomiarowy pozwolił na zautomatyzowanie pomiarów siły elektroadhezyjnej dla przyjętych warunków pomiarowych oraz zapewnił bezpieczne przeprowadzanie pomiarów. W tym doświadczeniu zbadano, z jaką siłą pad elektroadhezyjny przyciąga dany materiał, gdy pad zostanie zasilony napięciem 7 kV. W tym celu zbudowano układ pomiarowy składający się z ramienia, na którym przymocowano talerz (o średnicy 22 cm) z papierem gazetowym o gramaturze 50 g/m<sup>2</sup>. W skład układu zasilającego wchodził:

- powielacz napięcia – czyli kaskada Villarda dla napięcia dodatniego oraz osobno dla napięcia ujemnego. Została ona zbudowana z wykorzystaniem diod prostowniczych firmy Diodec Semiconductor – BY16-DIO oraz kondensatorów ceramicznych wysokonapięciowych firmy VISHAY o parametrach 1500pF/10kV.

- Generator - został wykonany samodzielnie w oparciu o moduł ewaluacyjny z mikrokontrolerem MSP-EXP430F5529 firmy Texas Instruments. Moduł posłużył za źródło sygnału PWM.
- Mostek typu H do wzmocnienia sygnału z generatora zbudowany z tranzystorów MOSFET: IRFP250 firmy STMicroelectronics.
- Zasilacz niskiego napięcia zbudowany samodzielnie. Regulowany zasilacz impulsowy sterowany był z komputera PC i wykorzystywał moduł ewaluacyjny z mikrokontrolerem MSP-EXP430FR2355 firmy Texas Instruments. Posiadał on analogowe układy komparatora oraz przetworniki AD i DA, a także układ PWM. Układy te posłużyły do regulacji napięcia wyjściowego zasilacza w połączeniu z modułem mostka typu H wyposażony w tranzystory IRFP250 firmy STMicroelectronics. Moduł MSP430 zasilacza dodatkowo sterował przełącznikiem wysokiego napięcia, który zbudowany był z kontaktronów DAT711215F firmy Cynergy3.

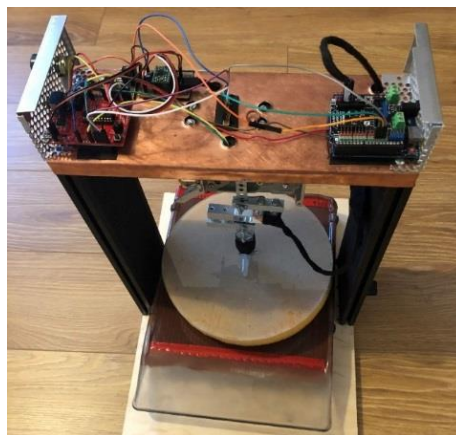
Dodatkowo układ zasilający został wyposażony w przełącznik wysokiego napięcia. Posiadał on trzy ustawienia polaryzacji: dodatnią, ujemną oraz depolaryzację samoistną. Dzięki tym trzem ustawieniom można było przeprowadzić szereg pomiarów z różnymi konfiguracjami parametrów zasilania pada elektroadhezyjnego. Druga część układu odpowiadała za przeprowadzenie i akwizycję danych (rysunek 3.1). W skład tego układu wchodził:

- moduł Arduino Uno z mikrokontrolerem AVR ATmega328 firmy Microchip, który odpowiedzialny był za akwizycję danych,
- dodatkowy moduł ewaluacyjny z mikrokontrolerem MSP-EXP430G2553 firmy Texas Instruments,
- tensometr: NA27 3kG (30N) SES-0354, w którym wymiana danych odbywała się za pośrednictwem modułu Arduino Uno,
- silnik krokowy sterowany przez Moduł z MSP430 poprzez moduł A4988 Stepper Motor Driver Carrier firmy Pololu,
- okrągła płyta o średnicy 22 cm, do której przymocowany był badany materiał,
- pad elektroadhezyjny umieszczony pod konstrukcją układu pomiarowego.



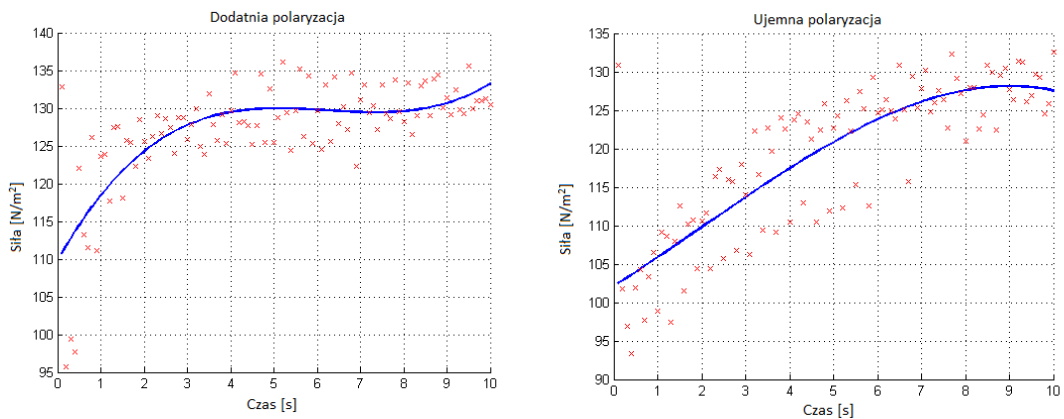
Rys. 3.1. Schemat układu zasilającego wraz z przełącznikiem wysokiego napięcia

Wyniki siły przyciągania były rejestrowane przez tensometr i wysyłane za pośrednictwem modułu mikroprocesorowego Arduino Uno do komputera. Wykorzystany w badaniach pad składał się z trzech części: miedzianej siatki, która została uziemiona, materiału dielektrycznego w postaci pleksiglasu oraz elektrody z napyłonej miedzi podłączonej pod wysokie napięcie. Na rysunku 3.2 przedstawiono zdjęcie układu pomiarowego z widocznymi elementami elektronicznymi odpowiadającymi za sterowanie windą oraz widoczne ramię wraz z talerzem, na którym został umieszczony materiał, czyli papier.



Rys. 3.2. Moduł pomiarowy z widocznymi elementami sterującymi windą z padem elektroadhezyjnym

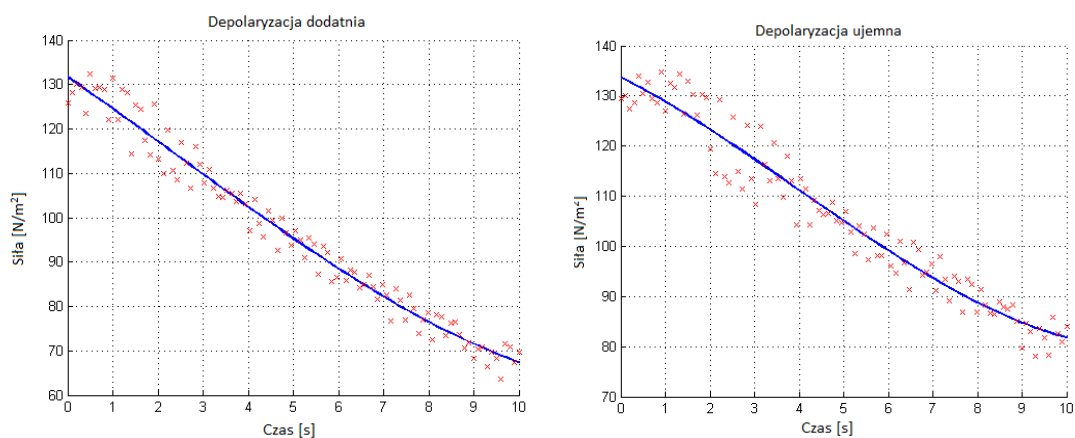
Zautomatyzowanie pomiarów siły elektrostatycznej pozwoliło na skrócenie czasu serii pomiarów, poprawiło powtarzalność pomiarów, ich precyzję oraz pozwoliło zachować ścisły reżim zależności czasowych pomiędzy poszczególnymi krokami algorytmu pomiarowego. Wyniki badania siły elektroadhezyjnej dla polaryzacji dodatniej i ujemnej przedstawiono na rysunku 3.3.



Rys. 3.3. Siła elektroadhezyjna przy polaryzacji dodatniej oraz ujemnej

Wyniki, jakie zostały zarejestrowane dla polaryzacji dodatniej mieściły się w skali od 93 N/m<sup>2</sup> do 136 N/m<sup>2</sup>. W pierwszych sekundach pomiaru HV+ siła, z jaką pad przyciągał materiał wzrastała, a następnie stabilizowała się. Pod koniec pomiaru następował lekki wzrost siły w granicach 136 N/m<sup>2</sup> oraz ujemnej od 105 N/m<sup>2</sup> do 135 N/m<sup>2</sup>. W przypadku polaryzacji ujemnej siła liniowo wzrastała do około 127 N/m<sup>2</sup>, po czym następował jej spadek. Powodem tego mogło być pole elektromagnetyczne wytwarzające się wokół pada, które prawdopodobnie spowodowało zakłócenia urządzeń pomiarowych lub występowanie wyładowań elektrycznych na powierzchni pada.

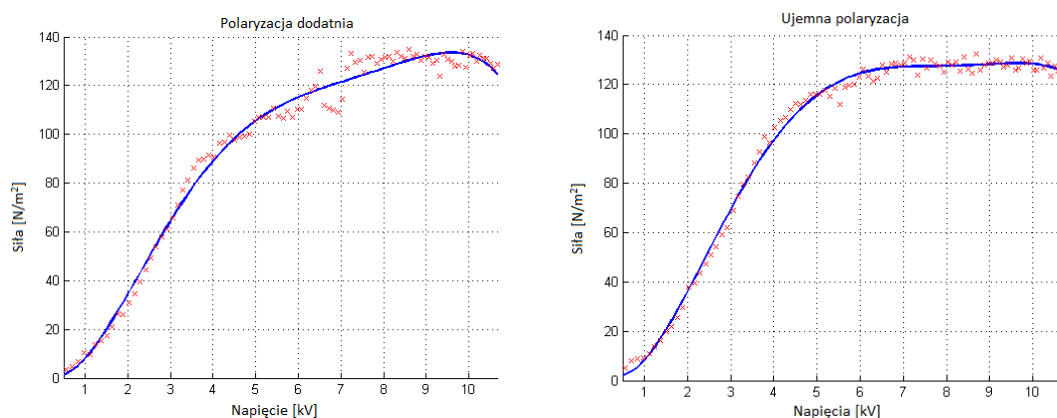
Drugim eksperymentem było zbadanie siły elektroadhezyjnej przy depolaryzacji samoistnej układu, czyli swobodnym rozładowywaniu układu. Procedura pomiarowa przebiegała podobnie do poprzednich dwóch badań. Wyniki dla depolaryzacji dodatniej i ujemnej przedstawiono poniżej na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Siła elektroadhezyjna podczas depolaryzacji z nastawioną polaryzacją dodatnią oraz ujemną

Przy depolaryzacji układu siła elektroadhezyjna gwałtownie oraz liniowo malała. W początkowym czasie pomiarów siła wynosiła  $132 \text{ N/m}^2$ , a po upływie 10 sekund zmalała do około  $70 \text{ N/m}^2$ . Podobne wyniki zostały zarejestrowane podczas pomiarów, gdy polaryzacja na przełączniku została ustawiona na dodatnią. Najwyższą wartość siły elektroadhezyjnej osiągnięto na początku pomiaru i wynosiła ona  $135 \text{ N/m}^2$ . Podczas depolaryzacji układu siła malała liniowo do wartości powyżej  $80 \text{ N/m}^2$ . Końcowa odnotowana siła jest wynikiem szczątkowego pola elektrostatycznego oddziałującego na papier umieszczony na talerzu.

Ostatnim eksperymentem przeprowadzonym na tym układzie pomiarowym było sprawdzenie, jak siła elektroadhezyjna zmieni się w zależności od wzrastającego napięcia. Na wykresie (rysunek 3.5) przy polaryzacji dodatniej siła przyciągania początkowo gwałtownie wzrastała, by przy około 5 kV ustabilizować się między  $100 \text{ N/m}^2$  a  $140 \text{ N/m}^2$ , następnie przy 10 kV siła nieco malała. Wynika to ze zmęczenia materiału, naelektryzowania się papieru oraz występowania słyszalnych wyładowań niezupełnych występujących na powierzchni pada.



Rys. 3.5. Zależność siły elektroadhezyjnej od zadanego napięcia przy nastawionej polaryzacji dodatniej ujemnej

Podczas wszystkich eksperymentów można było zaobserwować, że korzystniej jest dobrać napięcie około 7 kV. Siła elektroadhezyjna stabilizuje się powyżej 5 kV, co można zauważyć na wykresach polaryzacji i napięcia. Obserwowano także lokalne spadki siły, szczególnie w przypadku, gdy napięcie było wysokie. W końcowych etapach badań słyszalne były przeładowania ładunków w formie trzasków (wyładowania niezupełne). Podczas badań depolaryzacji układu, czyli samoistnego rozładowywania się pada, materiał nadal był przyciągany, jednak ze znacznie mniejszą siłą, niż w pozostałych eksperymentach. Ładunki reszkowe pozostające na powierzchni pada z czasem ulegały

rozładowaniu przez co siła gwałtownie malała. Materiały oraz konstrukcja pada pozwoliły na osiągnięcie maksymalnych wyników siły przyciągania w okolicach  $140 \text{ N/m}^2$ .

### 3.2 Podsumowanie badań

W tym rozdziale opisano badania przebić elektrycznych na powierzchni pada elektroadhezyjnego, przeprowadzono badanie siły zrywu oraz wpływ polaryzacji i przyłożonego napięcia na siłę elektroadhezyjną. Zaprojektowano i wykonano kilka padów elektroadhezyjnych, o różnych geometriach elektrod (spiralna i grzebieniowa oraz autorska przedstawiona) oraz z różnym dystansem między elektrodami, tak aby były one bezpieczne podczas użytkowania. Powstało kilka koncepcji układów zasilających pad elektroadhezyjny, które z czasem ewoluowały w ramach zautomatyzowania pomiarów i udoskonalenia przeprowadzanych badań.

W badaniach wykorzystano pad z elektrodami koplarnymi i niekoplarnymi oraz zastosowano różne materiały izolujące elektrody. Podczas badań nie zarejestrowano znaczącej różnicy między siłą elektroadhezyjną wytworzoną na padzie z elektrodą grzebieniową, a elektrodą w kształcie spirali. Zbyt wysokie napięcie powodowało przebicia znaczne upływności ładunku elektrycznego do otoczenia, a w skrajnym przypadku przebicia elektryczne między elektrodami na padzie i w konsekwencji prowadziło do trwałych uszkodzeń padów. Po przeprowadzeniu tych eksperymentów, zostały wysunięte następujące wnioski:

- po odłączeniu zasilania na powierzchni pada elektroadhezyjnego pozostają ładunki resztkowe, które nadal mogą utrzymać przyciągnięty materiał,
- w zależności od parametrów dielektrycznych pada elektroadhezyjnego oraz parametrów elektrody, pady wytrzymują wysokie napięcie bez występowania wyładowań niepełnych bądź elektrycznych,
- parametry materiałów przyciąganych przez pad (między innymi masa cząsteczkowa, rezystywność czy tekstura powierzchni), mają wpływ na siłę elektroadhezyjną.
- Parametry elektryczne, w tym polaryzacja zasilania elektrod, mają wpływ na siły przyciągające, jeśli pad posiada elektrody o niekoplarnym układzie elektrod. Depolaryzacja układu, która jest polaryzacją resztkową, utrzymuje przyciągnięty materiał w zależności od ilości ładunków resztkowych na powierzchni pada.

- Parametry elektrody (grubość elektrody i odległości między elektrodami oraz ich izolacja) ma wpływ na siłę przyciągania materiałów oraz występowanie wyładowań elektrycznych na powierzchni elektrod. Mniejsze odległości między elektrodami będą powodowały wyładowania elektryczne na padzie, a większa odległość będzie skutkować utratą właściwości przyciągających.

## 4 Symulacje komputerowe

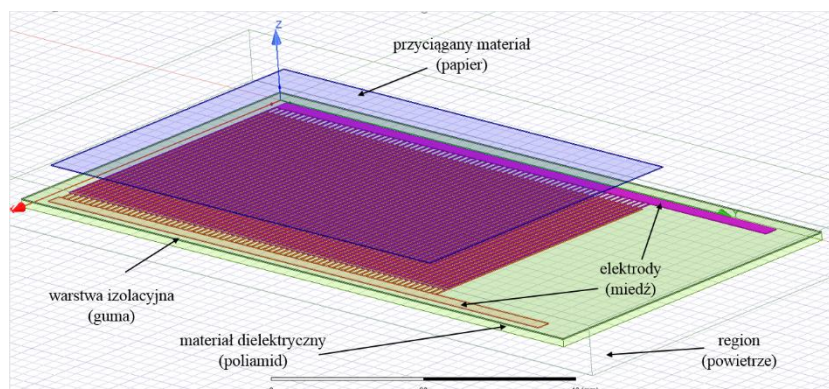
Po zakończeniu części badań laboratoryjnych przeprowadzono dodatkowe badania za pomocą symulacji komputerowej. W tym celu wykorzystano zasoby programu ANSYS, który oferował szereg możliwości symulacji między innymi z zakresu elektroniki i elektrotechniki. Podczas planowania symulacji z zastosowaniem padów elektroadhezyjnych przyjęto następujące założenia:

- zaprojektowanie padów elektroadhezyjnych, jak najbardziej zbliżonych (geometria, materiały dielektryczne, izolacyjne) do padów wykorzystywanych podczas badań laboratoryjnych,
- zastosowanie zbliżonych materiałów roboczych „przyciąganych” przez pad elektroadhezyjny,
- odwzorowanie parametrów napięciowych zasilania padów,
- rozszerzenie badań laboratoryjnych o dodatkowe symulacje poszerzające zakres przyjętych parametrów przeprowadzonych eksperymentów laboratoryjnych, np.: parametryzacja grubości warstw dielektryków czy odstępów między elektrodami.

### 4.1 Pady koplarnie

Pierwszą serię symulacji komputerowych wykonano dla padów wzorowanych na padach wykorzystanych we wcześniejszych eksperymentach. Pady zwymiarowano, a następnie zaprojektowano i narysowano bezpośrednio w edytorze graficznym ANSYS'a. Pad posiadał elektrody o koplarnym ułożeniu elektrod oraz kształcie grzebienia. Elektrody zostały wykonane z miedzi ( $\epsilon_r = 1$  F/m), które zostały pokryte warstwą izolacyjnej gumy o przenikalności  $\epsilon_r = 7$  F/m. Na rysunku 4.1 opisano poszczególne elementy pada oraz materiału, który był przyciągany.

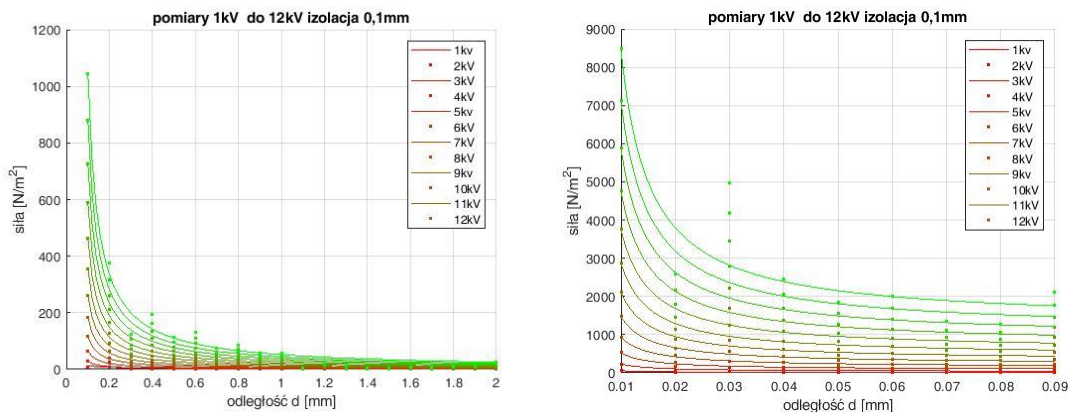




Rys. 4.1. Projekty pada z przyciąganym materiałem umiejscowionym nad elektrodami

Zastosowanym materiałem dielektrycznym był poliamid o przenikalności elektrycznej  $\epsilon_r = 4,3$  F/m. Katalog materiałów ANSYS'a oferował szereg różnorodnych materiałów, metali, tworzyw sztucznych, gazów itp. o różnych predefiniowanych parametrach elektrycznych. ANSYS do obliczeń symulacyjnych wymaga zdefiniowania przestrzeni, w której znajdował się badany obiekt

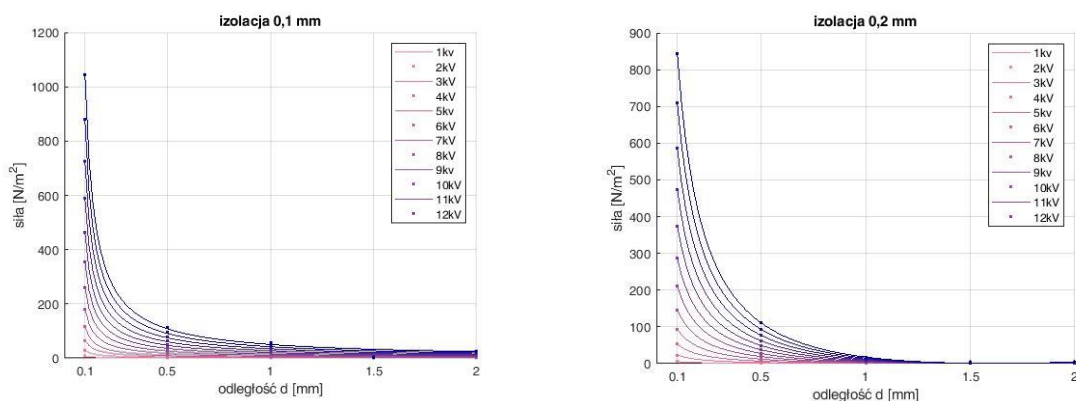
Do badań powstających sił elektroadhezyjnych wykorzystano papier, który stanowił tak zwany materiał przyciągany. Wymiary materiału były zbliżone do wielkości pada elektroadhezyjnego, który został umieszczony w niewielkiej odległości ( $d = 0,01$  mm) od pada elektroadhezyjnego. Podczas doboru zakresu odległości pada od materiału przyciąganego, do prowadzonych obliczeń symulacyjnych przyjęto minimalną odległość na poziomie  $0,01$  mm. Koniec badanego przedziału opisanego zakresu odległości ustalono na  $2$  mm. Pierwszą serię badań wykonano ze skokiem odległości  $d$  wynoszącym  $0,01$  mm, dla napięć zasilających pad w zakresie od  $1$  kV do  $12$  kV z krokiem co  $1$  kV. Obliczone punkty symulacji połączono krzywą utworzoną na podstawie dynamicznie dobieranego modelu aproksymacji. Pomiar siły elektroadhezyjnej wykonano przy zastosowaniu izolacji o grubości  $0,1$  mm, odległość materiału od pada od  $d = 0,01$  mm do  $d = 0,09$  mm, według napięcia. W drugiej serii przeprowadzonych symulacji odległość między padem a materiałem mieściła się w zakresie od  $d = 0,1$  mm do  $d = 2,0$  mm z krokiem co  $0,1$  mm. Wyniki przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Wykres zależności siły przyciągania materiału przez pad elektroadhezyjny przy ustalonej odległości (pada od materiału) w zakresie od 0,01 mm do 0,09 mm oraz w zakresie od 0,1 mm do 2,0 mm. Wykres dla różnych napięć zasilających pad oraz zastosowanej warstwie izolacyjnej materiału dielektryka pada wynoszącej 0,1 mm.

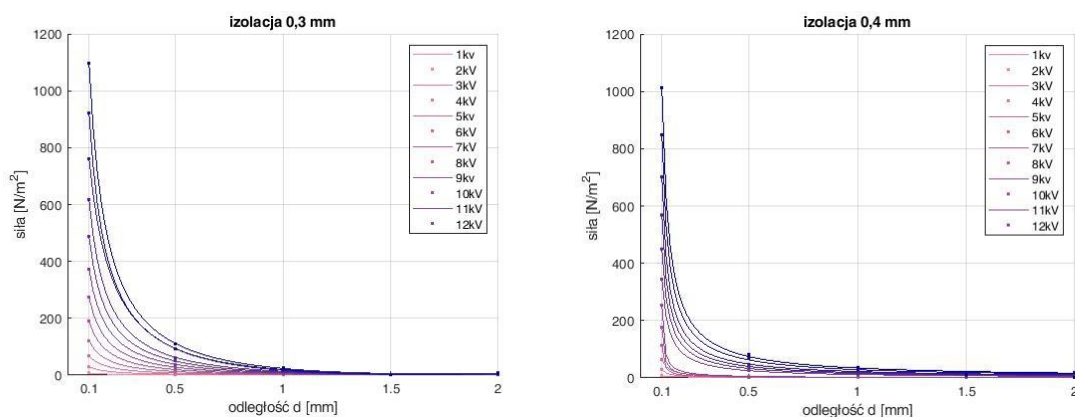
Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdzają wcześniej przedstawione (w rozdziale z badaniami laboratoryjnymi) pomiary rzeczywiste w zakresie wpływu odległości pada elektroadhezyjnego od przyciąganego materiału. Wyniki zestawione dla rysunków 4.2 przedstawiają krytyczny wpływ odległości pada od przyciąganego materiału na wartość generowanej siły elektroadhezyjnej. Wartość tej siły maleje silniej niż z kwadratem odległości, jak gdyby wynikało to bezpośrednio z prawa Coulomba (w zakresie małych odległości uwidacznia się wpływ dodatkowych sił oddziaływania Van der Waalsa). Dlatego przy praktycznych zastosowaniach padów elektroadhezyjnych w przemyśle (w chwytakach elektroadhezyjnych, gdzie wymagane jest bardzo często generowanie znaczących sił oddziaływania na jednostkę powierzchni) należy bezwzględnie zapewnić minimalizację zdefiniowanej odległości: pad elektroadhezyjny – materiał.

W kolejnych symulacjach została zmieniona grubość warstwy izolacyjnej, pokrywającej elektrody na padzie. Przeprowadzono symulacje od 1 kV do 12 kV. Pomiary przeprowadzono tylko dla pięciu odległości  $d$  między przyciąganym materiałem a padem ( $d$  równe: 0,1 mm, 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm). Wyniki dla odległości 0,1 mm oraz 0,2 mm przedstawiono na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Wyniki symulacji siły elektroadhezyjnej dla grubości warstwy dielektrycznej izolacji 0,1 mm oraz 0,2 mm

W kolejnych badaniach przeprowadzono symulacje z zastosowaniem izolacji o grubości 0,03 mm oraz 0,4 mm przedstawionej na rysunku 4.4.



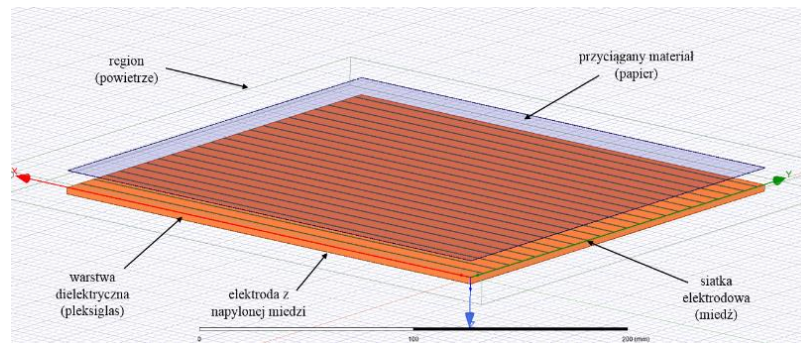
Rys. 4.4. Wyniki symulacji siły elektroadhezyjnej dla grubości warstwy dielektrycznej izolacji 0,3 mm oraz 0,4 mm

Początkowe pomiary siły, przy odległości 0,01 mm od pada przedstawiały się w zakresie od 20 do 1200 N/mm<sup>2</sup>. W kolejnym pomiarze (odległość 0,5 mm) ta siła gwałtownie spadła do zakresu między 20 a 100 N/mm<sup>2</sup>. We wszystkich badaniach, gdzie odległość materiału od pada wynosiła 2,0 mm, wyniki symulacji pokazały, że im większa odległość materiału od pada, tym mniejsza siła przyciągająca. Dla wszystkich przypadków maksymalnie wartości siły przy 2,0 mm wynosiły 20 N/mm<sup>2</sup>.

## 4.2 Pady niekoplarne

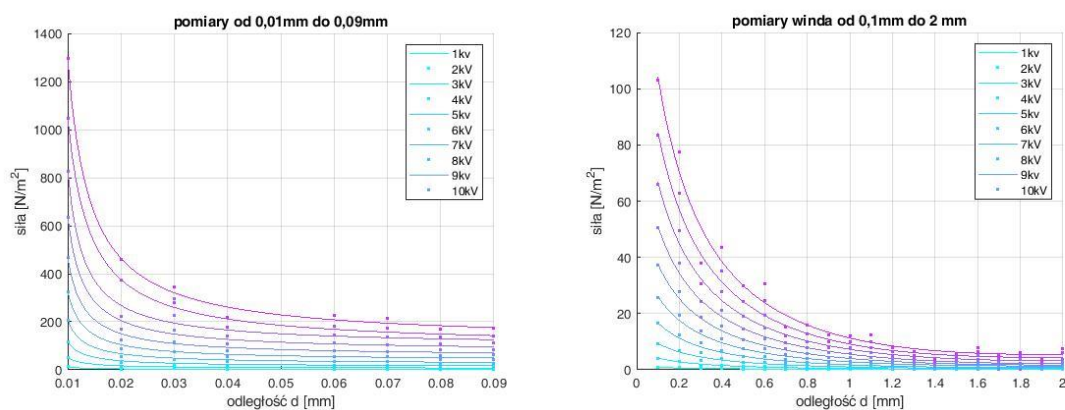
W badaniach, przedstawionych w rozdziale 3.4, przeprowadzono pomiary siły elektroadhezyjnej z wykorzystaniem układu pomiarowego składającego się z pada

elektroadhezyjnego umieszczonego na ramieniu windy wraz z siłomierzem. Badania te powtórzone w środowisku symulacyjnym. Odwzorowano projekt pada elektroadhezyjnego i dla ustalonych warunków zasilania wykonano analizy. Na rysunku 4.5 przedstawiono projekt pada elektroadhezyjnego wraz z opisem poszczególnych elementów konstrukcyjnych wykorzystanego do przeprowadzenia symulacji.



Rys. 4.5. Projekt pada z elektrodą w formie siatki oraz przyciąganym materiałem

Badanie zależności siły elektroadhezyjnej od napięcia przeprowadzono przy zasileniu miedzianej siatki. Zastosowanie mniejszej szczeliny między padem a materiałem skutkowało wytwarzaniem się silniejszej siły przyciągającej. Wraz ze zwiększeniem szczeliny między elementami, siła elektroadhezyjna, a przy tym siła przyciągająca słabła. Najwyższy wynik otrzymano dla napięcia 10 kV, gdzie siła wynosiła ponad 1300N/m<sup>2</sup>. W kolejnej serii pomiarowej badania rozpoczęto od odległości  $d = 0,1$  mm do  $d = 2,0$  mm z krokiem co 0,1 mm. Wyniki dla różnych napięć przedstawiono na wykresie 4.6.



Rys. 4.6. Zależność siły elektroadhezyjnej od napięcia zasilającego miedzianą siatkę (pomiary od  $d = 0,01$  mm do  $d = 0,09$  mm oraz pomiary od  $d = 0,1$  mm do  $d = 2,0$  mm odległości oraz zmiennego napięcia)

Uzyskane wyniki były o wiele mniejsze od poprzedniej konfiguracji zasilania elektrod. Ten odwrotny zabieg powtórzono w symulacjach komputerowych. Zasilono

elektrodę z napyłoną miedzią i uziemiono elektrodę z siatki, pod którą umieszczono przyciągany materiał. Wartości siły przyciągania przedstawione na wykresie maleją wraz ze zwiększającą się odległością materiału przyciąganego od pada elektroadhezyjnego. Minimalizowanie odległości roboczej pomiędzy powierzchnią pada elektroadhezyjnego a powierzchnią materiału ma bardzo duże znaczenie. W istocie ma większe znaczenie niż poziom napięcia zasilania pada oraz deformacje i nierówności materiału. Prowadzi to do lokalnego zwiększenia szczeliny pomiędzy padem a materiałem.

### **4.3 Podsumowanie symulacji**

W rozdziale przedstawiono badania symulacyjne siły elektroadhezyjnej, zmieniającej się wraz ze zwiększającą się grubością materiału izolującego elektrody, na padzie elektroadhezyjnym. Badanie polegało na zaprojektowaniu pada oraz przeprowadzeniu symulacji zwiększania odległości materiału przyciąganego (papieru) od powierzchni pada. Grubość zastosowanej warstwy izolującej elektrody pada również była zmienną, która miała wpływ na osiągnięte wyniki siły. Następnie po zaprojektowaniu kolejnego pada elektroadhezyjnego przeprowadzono badania siły elektroadhezyjnej oddziałującej na oddalający się materiał podczas zmiany napięcia zasilającego pad. W zakresie analizy uzyskano wyniki, które są zbieżne z wynikami badań laboratoryjnych.

Pakiet symulacyjny Maxwell w wersji 2021b nie uwzględniał niektórych parametrów występujących podczas badań laboratoryjnych. Nie było zatem możliwości symulacji parametrów elektrycznych, takich jak wyładowania niezupełne generujące ozon, który zanieczyszcza powietrze wokół pada. Nie ma wpływu na miejsce występowania wyładowania elektrycznego oraz w jakim czasie ono nastąpi. Środowisko ANSYS symuluje rzeczywistość w ograniczonym zakresie, ponieważ nie mamy wpływu na niektóre parametry. Można przez to rozumieć dokładne wykonanie materiałów (parametry dielektryczne oraz elektrody), które nie posiadają zarysowań, pęcherzyków powietrza, nierównych powierzchni oraz obecność czystego powietrza (bez cząsteczek kurzu, różnej wilgotności i ciśnienia atmosferycznego). Odzwierciedlenie wszystkich zjawisk i uwarunkowań środowiskowych, które występowały podczas badań laboratoryjnych było w tym przypadku niemożliwe. Narzędzie to pozwala jednak na wstępną ocenę projektowanych rozwiązań konstrukcyjnych padów.

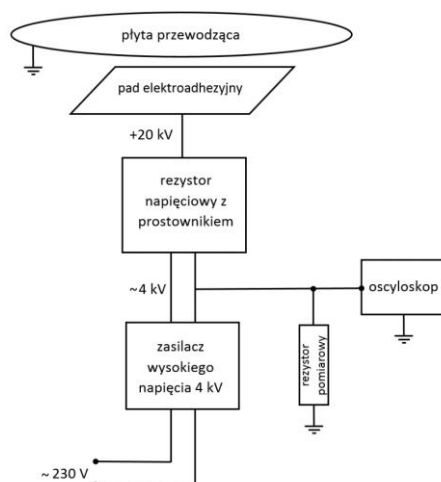
## 5 Bezpieczeństwo elektryczne i toksykologiczne

### 5.1 Struktury nanowęglowe oraz gazy ochronne

Podrozdział ten przedstawia eksperyment pomiarowy, w którym zbadano wpływ struktur nanowęglowych powlekających powierzchnie przewodzące (zasilone wysokim napięciem) na warunki generowania zjawisk wysokonapięciowych. Badane zjawiska dotyczyły upływności prądowej izolowanej płytki (pada elektroadhezyjnego), zjawisk jonizacji gazów otaczających pad, zjawisk optycznych towarzyszących jonizacji oraz detekcji gazów syntetyzowanych pod wpływem wysokiego napięcia. Badania przeprowadzono w środowisku gazowym o proporcjach odpowiadających składowi powietrza w warunkach normalnych oraz przy obniżonym ciśnieniu.

Materiałem przewodzącym był pad elektroadhezyjny w formie miedzianej folii o wymiarach 5,5 cm na 5,5 cm oraz grubości około 0,01 mm, która została pokryta grafenem i została przygotowana przez firmę zewnętrzną (oznaczenie producenta: Gr Cu 836,02). Na potrzeby eksperymentu zbudowano stanowisko pomiarowe składające się z zasilacza wysokonapięciowego o napięciu przemiennym 4 kV, którego wyjście połączono z wejściem powielacza napięcia w układzie Villarda. Wyjście wyprostowanego wysokiego napięcia (+20kV) połączono z płytką miedzianą, symulującą pad elektroadhezyjny. Do pomiaru prądu wysokiego napięcia zastosowano rezystor pomiarowy (100 Ohm, 0,1%), którego pierwszy koniec połączono z uziemieniem, a drugi z poziomem odniesienia powielacza Villarda. Takie połączenie umożliwiło rejestrację za pomocą oscyloskopu spadku napięcia na rezystorze pomiarowym i wyliczenie z prawa Ohma wartości płynącego prądu.

Dodatkowo wykorzystano kamerę UV (DayCor Superb) oraz światłowodową sondę FL-400 podłączoną do spektrofotometru (HR 4000 firmy Ocean Optics). Badania zostały przeprowadzone w normalnych warunkach środowiskowych panujących w pomieszczeniu oraz w szczelnym naczyniu z możliwością uzyskania w nim warunków zbliżonych do próżni. Poniżej na rysunku 5.1 przedstawiono schemat układu zasilającego wraz z układem pomiarowym.

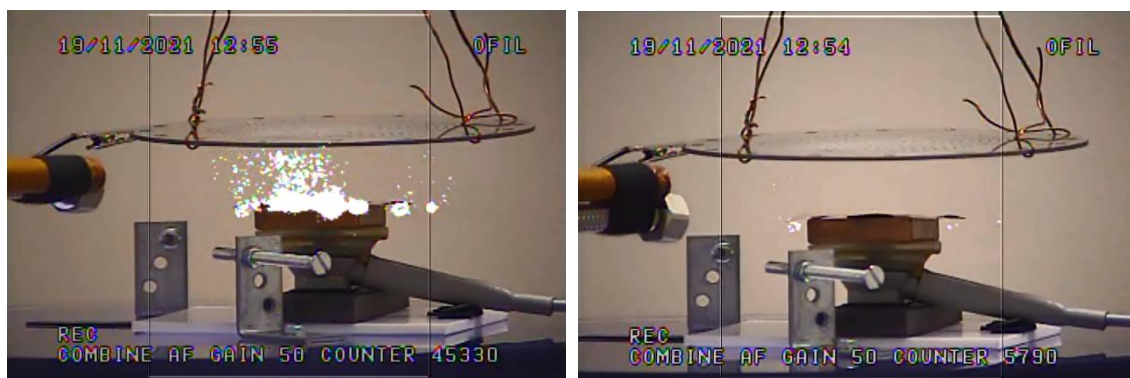


Rys. 5.1. Schemat układu zasilającego pad z płytą przewodzącą

Na teflonowej pokrywie umieszczono pad elektroadhezyjny, który został podłączony pod wysokie, stałe napięcie. W odległości około 3 cm nad padem umieszczono okrągłą przewodzącą płytę, która została uziemiona. Pomiary, jakie zostały przeprowadzone na tym układzie, uwzględniały warunki środowiskowe panujące w pomieszczeniu oraz w naczyniu. W tym celu zastosowano moduł mikroprocesorowy z czujnikami między innymi: temperatury, ciśnienia i wilgotności. Do pomiaru zawartości tlenu w mieszance powietrznej zastosowano dodatkowy czujnik tlenu podłączony do modułu Arduino Uno.

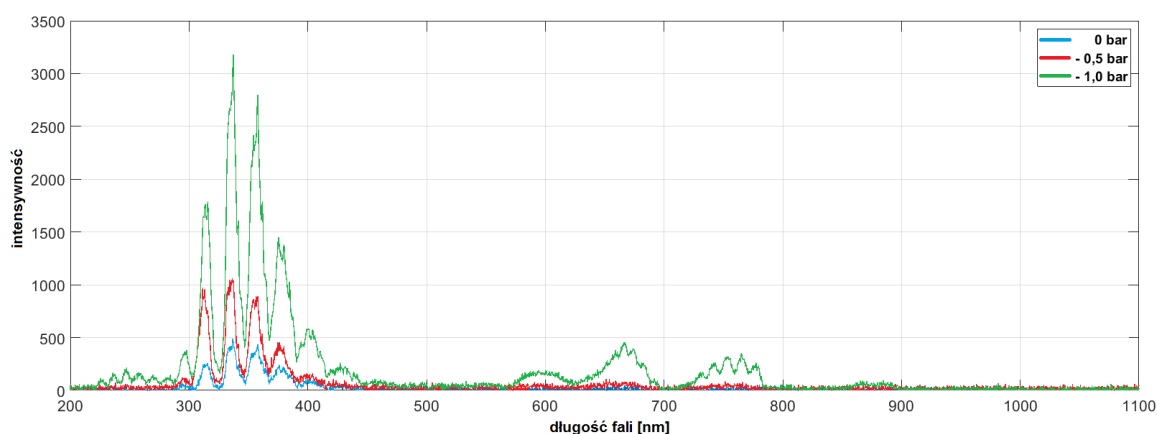
Eksperyment został również powtórzony w warunkach z obniżonymi parametrami środowiskowymi panującymi w naczyniu. Ze szczelnie zamkniętego naczynia, w którym umieszczono pad elektroadhezyjny wraz z przewodzącą płytą zostało usunięte powietrze do momentu osiągnięcia warunków zbliżonych do próżni. Obniżenie ciśnienia spowodowało spadek wilgotności oraz temperatury. Następnie naczynie zostało wypełnione, w zależności od badania, dwutlenkiem węgla lub argonem.

Podczas zasilania pada (napięciem 20 kV) na jego krawędziach zarejestrowano widoczne oraz słyszalne wyładowania koronowe w postaci łuków elektrycznych oraz poświaty koloru fioletowo - różowego. Kamera UV zarejestrowała emisję światła w zakresie ultrafioletu w przedziale od 230 do 280 nm. Zastosowana kamera posiadała również możliwość zliczania ładunków elektrycznych na podstawie rejestracji mikrowyładowań. Maksymalne ilości zliczeń ładunków jakie otrzymano kolejno dla poszczególnych gazów to: CO<sub>2</sub> – 5790 ładunków, argon – 45330 ładunków oraz pomiar dla mieszanki powietrznej – 11760 ładunków (rysunek 5.2).



Rys. 5.2. Pomiar liczby ładunków podczas użycia argonu(45330) oraz dwutlenku węgla (5790) na pad elektroadhezyjny

Nad padem elektroadhezyjnym w miejscu występowania łuku elektrycznego zamontowano spektrofotometr, który analizował widmo światła wytwarzanego przez wyładowanie. Pełny obraz spektrum przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Widmo światła zarejestrowane przez spektrofotometr podczas badań w warunkach o obniżonym ciśnieniu

W trakcie badań przeprowadzanych w laboratorium między padem elektroadhezyjnym a przewodzącą płytą występowały wyładowania koronowe, charakteryzujące się łukami elektrycznymi oraz łuną o zabarwieniu fioletowo - różowym. Dodatkowo podczas wyładowań powietrze wokół było silnie zjonizowane, co objawiało się charakterystycznym zapachem ozonu. Dla zwiększenia bezpieczeństwa eksperymentów po każdym pomiarze do laboratorium wpuszczane było świeże powietrze. Pomiar z wykorzystaniem dwutlenku węgla pokazały, że wyładowania koronowe maleją wraz ze zwiększaniem ilości gazu wprowadzanego na powierzchnię

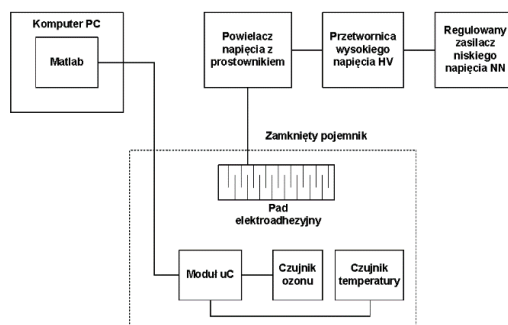


pada elektrodhezyjnego, natomiast argon sprzyjał przebiegom elektrycznym oraz zwiększał intensywność wyładowań koronowych. Podobne wyniki uzyskano w szczelnym naczyniu, gdy dwutlenek węgla zmniejszał intensywność wyładowań, natomiast argon potęgował ich intensywność.

## 5.2 Problem generowania ozonu

Podczas badań z zastosowaniem struktur nanowęglowych na powierzchni pada elektrodhezyjnego zauważono, że przy występowaniu wyładowań niepełnych odczuwalny jest charakterystyczny zapach ozonu. Zdecydowano na przeprowadzenie eksperymentu i zbadanie stężenia ozonu podczas zasilania pada elektrodhezyjnego wysokim napięciem. Określono, czy otrzymane stężenie nie będzie wywoływało skutków ubocznych podczas wdychania ozonu w czasie trwania pomiarów.

W celu zbadania stężenia ozonu zbudowano stanowisko pomiarowe komunikujące się z komputerem za pośrednictwem programu MATLAB. Pad elektrodhezyjny został zasilony z regulowanego zasilacza niskiego napięcia przez przetwornicę wysokiego napięcia oraz powielacz napięcia z prostownikiem. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono poniżej na rysunku 5.4.



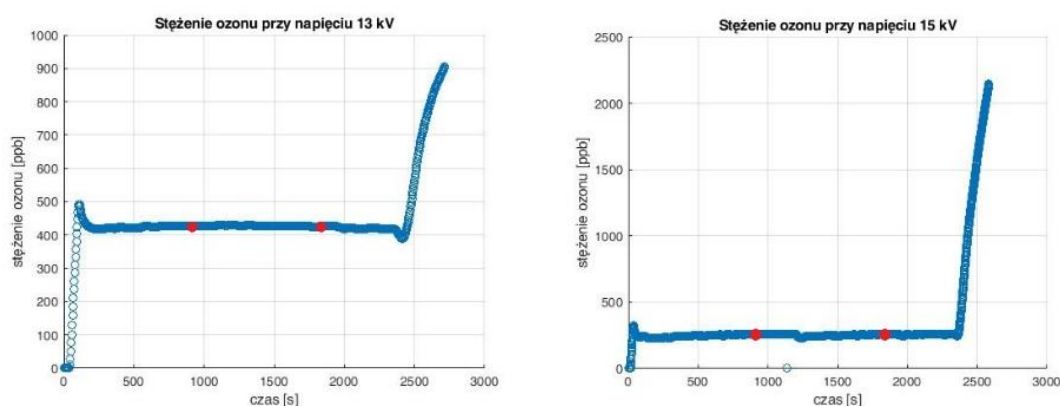
Rys. 5.4. Stanowisko pomiarowe z układem zasilającym oraz pojemnikiem, w którym przeprowadzono pomiar

Do zbadania stężenia ozonu wykorzystano moduł z czujnikiem Gravity DFRobot SEN0321, który został umieszczony wraz z padem w zamkniętym pojemniku. Dodatkowo za pomocą modułu Silicon Labs zmierzono parametry środowiskowe panujące w laboratorium, które wynosiły: temperatura 23,4°C, wilgotność 37% oraz ciśnienie 1001 mbar.

Aby wytworzyć wyładowania niepełne, wykorzystano pad elektrodhezyjny wykonany z dielektrycznego materiału. Badanie, które miało na celu sprawdzenie stężenia ozonu podczas wyładowań niepełnych na powierzchni pada

elektroadhezyjnego, przeprowadzono w trzech etapach. Etap pierwszy polegał na umieszczeniu czujnika ozonu obok pada elektroadhezyjnego i przeprowadzeniu pomiarów dla napięcia 13 kV oraz 15 kV zasilających pad. W drugim etapie umieszczono czujnik 10 cm pod padem, natomiast w trzecim etapie czujnik znajdował się na dnie naczynia w odległości 30 cm od pada elektroadhezyjnego.

Badanie rozpoczynano od włączenia modułu mikroprocesorowego wraz z czujnikiem ozonu, a następnie mierzono stężenie przez 15 min w warunkach panujących w pojemniku. Po ustabilizowaniu się czujnika, włączono zasilanie pada elektroadhezyjnego wysokim napięciem tak aby dochodziło do wyładowań niezupełnych. Po upływie 15 min wyłączano zasilanie i mierzono stężenie ozonu jeszcze przez 15 min. Cały pomiar trwał 45 min. Na rysunku 5.5 przedstawiono przykładowe wyniki otrzymane dla etapu II przy zastosowaniu napięcia zasilającego 13 kV oraz 15 kV.



Rys. 5.5. Etap II : Stężenie ozonu przy napięciu 13 kV oraz 15 kV z czujnikiem umieszczonym obok pada

Maksymalne wyniki osiągnięte podczas pomiarów dla trzech etapów i różnych napięć zestawiono w tabeli 5.1. Pomimo uzyskanych większych wartości stężenia ozonu nie była ona toksyczna dla człowieka

Tabela 5.1. Zestawienie maksymalnych wyników wytworzonego ozonu dla napięć 13 kV i 15 kV

| umiejscowienie czujnika ozonu | napięcie 13 kV | napięcie 15 kV |
|-------------------------------|----------------|----------------|
| obok pada                     | 480 ppb        | 2400 ppb       |
| 10 cm pod padem               | 900 ppb        | 2300 ppb       |

|                 |         |          |
|-----------------|---------|----------|
| 30 cm pod padem | 750 ppb | 1500 ppb |
|-----------------|---------|----------|

### 5.3 Podsumowanie rozdziału

Przeprowadzono badania z wykorzystaniem wysokiego napięcia 13 kV oraz 15 kV zasilającego pad elektroadhezyjny, tak aby dochodziło do wyładowań niezupełnych i wytwarzania się ozonu. Stężenia ozonu zostało mierzone przez 45 min z uwzględnieniem kalibracji czujnika, zasilenia pada oraz zbadaniem ozonu po wyłączeniu zasilania pada. Czujnik został umieszczony w trzech konfiguracjach, czyli obok pada elektroadhezyjnego, 10 cm pod padem oraz na dnie pojemnika w odległości 30 cm od pada. Pomiar stężenia ozonu wynosiły od 0,5 ppm do 2,3 ppm i były to dawki nietoksyczne dla człowieka, jedynie mogące spowodować podrażnienia. Gdyby pomiar był przeprowadzony dłużej, a stężenie ozonu w naczyniu by wzrosło istnieje ryzyko zatrucia ozonem, które mogłoby prowadzić do uszkodzenia górnych dróg oddechowych oraz problemów z oddychaniem. W przypadkach krytycznych, bardzo wysokie stężenie ozonu (od 9 ppm) mogłoby doprowadzić do zgonu. Dlatego, podczas badań z wykorzystaniem urządzeń elektroadhezyjnych, przy których dochodzi do wytworzenia się wyładowań niezupełnych i generowania ozonu należy przebywać w odpowiednio wentylowanym pomieszczeniu oraz pamiętać o zabezpieczeniach miejsca pracy w celu uniknięcia porażenia prądem elektrycznym. Na podstawie otrzymanych wyników oraz obserwacji, wyprowadzono następujące wnioski:

- zastosowanie małej odległości między elektrodami spowoduje wystąpienie przebiecia elektrycznego, nawet przy zastosowaniu mniejszego napięcia (na tyle małego by nie doszło do wytworzenia się właściwości elektroadhezyjnych). Większe odległości między elektrodami umożliwią zastosowanie większego napięcia zasilającego, które wytworzy siłę elektroadhezyjną i przyciągnie przedmiot. Jednakże, jeśli odległość będzie zbyt duża, siła elektroadhezyjna zmaleje, natomiast zastosowanie większego napięcia spowoduje przebiecie elektryczne i uszkodzenie pada oraz materiału.
- Zastosowanie helu oraz argonu jako izolator opływający powierzchnię pada, będzie skutkowało częstszym i intensywniejszym występowaniem wyładowań koronowych na padzie, natomiast użycie dwutlenku węgla spowoduje zmniejszenie wyładowań niezupełnych.

- Środowisko o obniżonym ciśnieniu sprzyja występowaniu wyładowań koronowych na powierzchni pada.
- Podczas pracy pada elektroadhezyjnego pod zbyt wysokim napięciem, może dochodzić do wyładowań elektrycznych wytwarzających ozon. Istnieje potrzeba rozwiązania tego problemu, zwłaszcza podczas pracy w warunkach pomieszczeń zamkniętych.

## 6 Podsumowanie

W rozprawie postawiono następującą tezę: „Dobór sposobu budowy padów elektroadhezyjnych oraz materiałów elementów konstrukcyjnych systemu elektroadhezyjnego, przy modyfikacji algorytmu sterowania napięciem zasilania padów, pozwala zapewnić bezpieczeństwo elektryczne oraz toksykologiczne pracy personelu obsługującego system, przy zachowaniu jego istotnych parametrów użytkowych, takich jak wartość generowanej siły elektroadhezyjnej, czy całkowite gabaryty urządzenia.”

W celu potwierdzenia tezy, wykonano szereg układów zasilająco – pomiarowych, które generowały siłę elektroadhezyjną. Oprócz zbadania zależności parametrów elektrycznych, dielektrycznych podłoża oraz materiału przyciąganego, zbadano zjawiska degradacji elektrod pod wpływem zbyt wysokiego napięcia zasilającego. Skutkowało to występowaniem wyładowań niepełnych pomiędzy elektrodami padów. Powstałe uszkodzenia zbadano po zastosowaniu izolacji powietrznej między elektrodami oraz izolacją wykonaną z dielektryka stałego. Po przeanalizowaniu czynników wpływających na wartość generowanej siły elektroadhezyjnej, zaproponowano metody oraz układy pomiarowe będące zautomatyzowanym, a przede wszystkim bezpiecznym systemem elektroadhezyjnym. Zaproponowano autorskie rozwiązania budowy pada podnoszące bezpieczeństwo użytkowania systemu elektroadhezyjnego. Ten etap prac zakończył się zgłoszeniem patentowym, które otrzymało ochronę.

Zaprojektowany pad elektroadhezyjny uwzględniający warunki BHP, zamodelowano w środowisku symulacyjnym ANSYS. Badania umożliwiły wykonanie szeregu dodatkowych analiz, które na etapie badań laboratoryjnych byłyby czasochłonne oraz kosztowne (na przykład analiza parametryczna grubości izolacji materiałów). Ze względu na złożoność algorytmu sterowania napięciem zasilania pada, niektóre parametry nie zostały przebadane symulacyjnie. Przedstawione badania laboratoryjne oraz przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły postawioną tezę. Uzyskane

konstrukcje pada elektroadhezyjnego poprawiają bezpieczeństwo użytkowania urządzenia przy zachowaniu parametrów użytkowania systemu.

Przedstawiono również zjawisko generacji toksycznego dla człowieka ozonu, powstającego w powietrzu, między innymi podczas wyładowań niezupełnych podczas pracy padów. Badania te pozwoliły na optymalizację algorytmów sterujących procesem zasilania padów. Uzyskane stężenia ozonu podczas pracy systemu elektroadhezyjnego, mieszczą się w normach zawartych w rozporządzeniu w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, co pozwala na potwierdzenie tezy.

W rozprawie znajdują się również zestawienia badań, które będą kontynuowane w dalszej pracy naukowej. W kontekście bezpieczeństwa i problemu generacji ozonu (w środowisku gazowym o składzie powietrza), wykorzystano gazy ochronne, usuwające substraty do syntezy ozonu z otoczenia padów. Kolejne badania będą dotyczyły wpływu proponowanych gazów ochronnych na wartość generowanej siły elektroadhezyjnej. W pracy zawarto również wstępne badania, w których do optymalizacji wartości uzyskanej siły oraz redukcji ilości generowanego ozonu wykorzystano struktury nanowęglowe. Zagadnienia te częściowo wykraczają poza zakres postawionej w rozprawie tezy, dlatego będą przedmiotem przyszłych badań.

## Bibliografia

- [1] R. P. Krape, *“Applications Study Of Electroadhesive Devices”*, National Aeronautics And Space Administration, No. NASA-CR-1211. NASA, 1968,
- [2] G. P. Beasley and W. W. Hankins, *“Development of electroadhesive devices for zero-g intraextravehicular activities,”* in AIAA, pp. 71– 853,1971,
- [3] D. Ruffatto, J. Shah, M. Spenko, *“Increasing the adhesion force of electrostatic adhesives using optimized electrode geometry and a novel manufacturing process”*, Jurnal of Electrostatics, vol. 72, no. 2, pp. 147–155, Apr 2014,
- [4] B. F. Seitz, B. Goldberg, N. Doshi, O. Ozcan, D. L. Christensen, E. W. Hawkes, M. R. Cutkosky, and R. J. Wood, *“Bio-inspired mechanisms for inclined locomotion in a legged insect-scale robot,”* in 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 791–796, 2014,
- [5] A. Yamamoto, T. Nakashima, and T. Higuchi, *“Wall climbing mechanisms using electrostatic attraction generated by flexible electrodes,”* in 2007 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp. 389–394, 2007,
- [6] H. Prahlad, R. Pelrine, S. Stanford, J. Marlow, R. Kornbluh, *“Electroadhesive robots-wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion*

- technology*”, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008,
- [7] J. M. Crowley, “*Electrostatic fundamentals*” in Handbook of electrostatic processes, no. 1, pp. 1–5, 1995,
  - [8] Kwan-Chi Kao, “*Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes*”, San Diego; Elsevier Academic Press, 2004,
  - [9] J. M. Crowley, “*Electric fields with known voltages*”, in Fundamentals of applied electrostatics, 1st ed., Laplacian Press, pp. 18–22, 1999,
  - [10] Z. Ahmad, “*Polymeric dielectric materials*”, Dielectric Material, M. A. Silaghi, Ed. InTech, pp. 3–26, 2021,
  - [11] S. Giblisco and S. Monk, “*Teach Yourself Electricity and Electronics*”, McGraw-Hill, 2016,
  - [12] R. W. Warning, “*Electrostatic force employed to hold work-pieces*”, La Physique des Forces Electrostatiques et leurs Applications, pp. 117–127, 1960,
  - [13] B. C. Leung, L. A. Miller, N. R. Goeser, S. Gonzalez, “*Validation of Electroadhesion as a Docking Method for Spacecraft and Satellite Servicing*”, Aerospace Conference, 2015 IEEE : date 7-14 March 2015., vol. 1. 2015,
  - [14] G. A. Wardly, “*Electrostatic wafer chuck for electron beam microfabrication*”, Review of Scientific Instruments, vol. 44, no. 10, pp. 1506–1509, 1973,
  - [15] P. M. Taylor, G. J. Monkman, G. J. F. Farnworth, “*Principles of electroadhesion in clothing robotics*”, International Journal of Clothing Science and Technology, vol. 1, no. 3. pp. 14–20, Mar. 01, 1989,
  - [16] G. J. Monkman, “*Robot grippers for use with fibrous materials*”, Int. J. Rob. Res., vol. 14, no. 2, pp. 144–151, 1995,
  - [17] Z. Zhang, J. a Chestney, and M. Sarhadi, “*Characterizing an electrostatic gripping device for the automated handling of non-rigid materials,*” Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., vol. 215, no. 1, pp. 21–36, 2001,
  - [18] Grabit, “*Revolutionizing Material Handling with Electroadhesion*”, [Online]: <http://grabitinc.com/>. [Dostęp: 24.02.2023]
  - [19] J. Guo, L. Justham, M. Jackson, and R. Parkin, “*A concept selection method for designing climbing robots,*” in Key Engineering Materials, Key Eng. Mater., vol. 649, pp. 22– 29, 2015,
  - [20] K. Yatsuzuka, F. Hatakeyama, K. Asano, and S. Aonuma, “*Fundamental characteristics of electrostatic wafer chuck with insulating sealant,*” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no. 2, pp. 510–516, 2000,
  - [21] G. J. Monkman, “*Electrostatic techniques for fabric handling,*” ,MSc Thesis, The University of Hull, 1987,
  - [22] M. A. Graule, P. Chirarattananon, S. B. Fuller, N. T. Jafferis, K. Y. Ma, M. Spenko, R. Kornbluh, and R. J. Wood, “*Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion,*” Science (80-. ), vol. 352, no. 6288, pp. 978–982, 2014,
  - [23] J. A. Chestney, M. Sarhadi, “*Dielectric selection for a robotic electrostatic gripping device,*” in Seventh International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, no. 430, pp. 23–26, 1996,

- [24] K. H. Koh, M. Sreekumar, S. G. Ponnambalam, “*Experimental investigation of the effect of the driving voltage of an electroadhesion actuator,*” *Materials*, vol. 7, no. 7, pp. 4963–4981, 2014,
- [25] S. J. Woo, T. Higuchi, “*Electric field and force modeling for electrostatic levitation of lossy dielectric plates,*” in *Journal of Applied Physics*, vol. 108, no. 10, 2010,
- [26] Z. Huang, P. Wang, M. Li, L. Sun, L. Li, “*Study on wall-climbing robot based on flexible electrostatic attraction technique,*” *Mach. Des. & Manuf*, vol. 6, pp. 166–168, 2010,
- [27] P. M. Taylor, G. J. Monkman, and G. E. Taylor, “*Electrostatic grippers for fabric handling,*” in *1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 431–433, 1988,
- [28] K. H. Koh, K. C. Ramanathan, and S. G. Ponnambalam, “*Modeling and simulation of electrostatic adhesion for robotic devices,*” in *2012 International Conference on Electronics, Information and Communication Engineering*, vol. 11, pp. 208–216, 2012,
- [29] J. Guo, T. Bamber, T. Hovell, M. Chamberlain, L. Justham, M. Jackson, “*Geometric Optimisation of Electroadhesive Actuators Based on 3D Electrostatic Simulation and its Experimental Verification,*” in *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 21, pp. 309–315, 2016,
- [30] V. Saberland, Y. Hojjat, and H. M. Hasanzadeh, “*Study of parameters affecting the electrostatic attractions force,*” *Int. J. Electr. Comput. Electron. Commun. Eng.*, vol. 8, no. 11, pp. 1628–1631, 2014,
- [31] K. H. Koh, M. Sreekumar, and S. G. Ponnambalam, “*Feasibility study for applying electrostatic adhesion on wall climbing robots,*” *International Conference on Advances in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques - MAPT*, pp. 31–36, 2014,
- [32] J. B. Mao, L. Qin, W. X. Zhang, L. Xie, and Y. Wang, “*Modeling and analysis of electrostatic adhesion force for climbing robot on dielectric wall materials,*” *EPJ Applied Physics*, vol. 69, no. 1, 2015,
- [33] R. Liu, R. Chen, H. Shen, and R. Zhang, “*Wall climbing robot using electrostatic adhesion force generated by flexible interdigital electrodes,*” *Int J Adv Robot Syst*, vol. 10, Jan. 2013,
- [34] K. H. Koh, M. Sreekumar, and S. G. Ponnambalam, “*Hybrid electrostatic and elastomer adhesion mechanism for wall climbing robot,*” *Mechatronics*, vol. 35, pp. 122–135, May 2016,
- [35] C. J. C. Heath, I. P. Bond, and K. D. Potter, “*Integrating electrostatic adhesion to composite structures,*” in *Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies 2015*, , vol. 9433, p. 94330Dm, 2015,
- [36] G. A. Wardly, “*Electrostatic wafer chuck for electron beam microfabrication*”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 44, no. 10, pp. 1506–1509, 1973,
- [37] J. P. D. Téllez, J. Krahn, and C. Menon, “*Characterization of electroadhesives for robotic applications,*” in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1867–1872, 2011,
- [38] L. Savioli, G. Sguotti, A. Francesconi, F. Branz, J. Krahn, and C. Menon, “*Morphing electroadhesive interface to manipulate uncooperative objects,*” in *Sensors and Smart*

- Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014, vol. 9061, p. 906129, 2014,
- [39] K. Asano, F. Hatakeyama, and K. Yatsuzuka, "Fundamental study of an electrostatic chuck for silicon wafer handling," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.38, no. 3, pp. 840–845, May 2002.
- [40] R. Chen, R. Liu, and H. Shen, "A gecko inspired wall-climbing robot based on electrostatic adhesion mechanism," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 369–401, 2013,
- [41] A. Rivadeneyra, J. Fernández-Salmerón, J. Banqueri, J. A. López-Villanueva, L. F. Capitan-Vallvey, and A. J. Palma, "A novel electrode structure compared with interdigitated electrodes as capacitive sensor," *Sens Actuators B Chem*, vol. 204, pp. 552–560, Dec. 2014,
- [42] B. D. Jensen, S. Mutlu, S. Miller, K. Kurabayashi, and J. J. Allen, "Shaped comb fingers for tailored electromechanical restoring force," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 373–383, Jun. 2003,
- [43] P. F. Harouche and C. Shafai, "Simulation of shaped comb drive as a stepped actuator for microtweezers application," in *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 123–124, pp. 540–546, Sep. 2005,
- [44] H. Allison, R. K. Fricker, and M. C. Smit, "Electro adhesion device," US Patent No. 6791817. U.S. Patent and Trademark Office, 2001,
- [45] J. Berenguères, M. Urago, S. Saito, K. Tadakuma, and H. Meguro, "Gecko inspired electrostatic chuck," in *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1018–1023, 2006,

### Spis publikacji autorki

1. Kalus Wiktoria, Zmarzły Dariusz; *Zastosowanie mikroprocesora Nucleo do sterowania nadążnym systemem fotowoltaicznym*; Poznań University of Technology Academic Journals No 96, 2018
2. Kalus Wiktoria, Zmarzły Dariusz; *Wykorzystanie środowiska MATLAB I Keil do analizy wydajności samonadążnego systemu fotowoltaicznego*; Poznań University of Technology Academic Journals No 96, 2018
3. Kalus Wiktoria; *The phenomenon of electroadhesion*; *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej "Elektryka"*, z 76, str 45 - 46, nr 368/2018
4. Kalus Wiktoria; *Study of the phenomenon of electroadhesion*; *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej "Elektryka"* z 76, str 46 - 47, nr 368/2018
5. Kalus Wiktoria; Nagi Łukasz; *Wpływ kształtu elektrod padów elektroadhezyjnych na moment trzymający siły elektrostatycznej*; *Przegląd Elektrotechniczny* 1, 190 –192, 2018.
6. Kalus Wiktoria; Nagi Łukasz Michał Koziół; *The influence of the shape of pads on the electroadhesive force* - 20<sup>th</sup> International Conference on Electric Power Engineering, 15-17.05.2019 Kouty nad Desnou



7. Kalus Wiktoria, Jarosław Zygarlicki; *Break down voltage on electroadhesive pads* Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej „Elektryka”, z. 77, str 53 – 56, nr 369/2019
8. Kalus Wiktoria, Jarosław Zygarlicki; *Dielectric material electroadhesive pads* Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej „Elektryka” z. 77, str 57 - 59, nr 369/2019
9. Kalus Wiktoria, Jarosław Zygarlicki; *Electroadhesive force test system*; Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej „Elektryka”, z. 77, str 61 - 64, nr 369/2019
10. Kalus Wiktoria, Zygarlicki Jarosław, Nagi Łukasz; *The pull-off test of different materials using electroadhesive pads*; Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 96 NR 11/2020
11. Kalus Wiktoria, Nagi Łukasz, Zygarlicki Jarosław; *“Analysis of Potential of Raising Forces Acting on Electroadhesive Pads Depending on Polarization and Supply Parameters”*; Energies 2021, 14, 2517; doi.org/10.3390/en14092517
12. Kalus Wiktoria Jarosław Zygarlicki, Nagi Łukasz, Koziół Michał; *Application of nanocarbon structures to optimize the design parameters of conductive surfaces of electroadhesive pads*; 2021 6th International Conference on Nanotechnology for Instrumentation and Measurement (NanofIM); 2021; doi: 10.1109/NanofIM54124.2021.9737345
13. Kalus Wiktoria Jarosław Zygarlicki, Nagi Łukasz, Koziół Michał, *The problem of ozone generation in electroadhesion devices*; Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 10/2022; doi:10.15199/48.2022.10.37

## **Patenty**

1. Nagi Łukasz, Kalus Wiktoria, Zygarlicki Jarosław, “Pad elektroadhezyjny” Wynalazek, Chroniony, Numer zgłoszenia: P.432808, Numer patentu/prawa: Pat.240042, Data zgłoszenia: 03-02-2020, Data udzielenia prawa: 04-11-2021, Publikacja patentu/wzoru: [WUP 07-02-2022]