

Polska Akademia Nauk  
Komitet Elektrotechniki  
Sekcja Materiałów i Technologii Elektrotechnicznych

Henryka Danuta Stryczewska

TECHNOLOGIE PLAZMOWE  
W ENERGETYCE I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
Lublin 2009

OPINIODAWCY:

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kołaciński  
Prof. zw. dr hab. inż. Czesław Królikowski

Projekt okładki i skład komputerowy:  
Grzegorz Komarzyniec

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE  
Copyright by Politechnika Lubelska

ISBN 978-83-7497-070-9

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI LUBELSKIEJ  
20-109 Lublin, ul. Bernardyńska 13  
E-mail: wydawnictwo@pollub.pl

Druk: Drukarnia Pektor Sp. z o.o.  
20-341 Lublin, ul. Przesmyk 7

## SPIS TREŚCI

Przedmowa .....	7
1. WPROWADZENIE DO PROBLEMÓW OCHRONY ŚRODOWISKA NATURALNEGO.....	10
1.1. Energetyka i zrównoważony rozwój.....	15
1.2. Problemy zanieczyszczenia środowiska naturalnego .....	17
1.3. Zanieczyszczenia powietrza .....	19
1.4. Problemy zanieczyszczenia wody i gleb .....	22
1.5. Podsumowanie .....	24
2. TECHNOLOGIE PLAZMOWE.....	25
2.1. Właściwości i podział plazmy .....	26
2.2. Plazma nietermiczna – warunki generacji i zastosowania.....	30
2.3. Wyładowania elektryczne jako źródło plazmy .....	35
2.4. Wyładowania przy napięciu stałym DC .....	39
2.5. Wyładowania koronowe .....	41
2.6. Wyładowania częstotliwości radiowej.....	45
2.7. Wyładowania impulsowe.....	48
2.8. Wyładowania dielektryczne barierowe DBDs.....	49
2.9. Wyładowania jarzeniowe przy ciśnieniu atmosferycznym .....	51
2.10. Wyładowania w mikro-otworach i kapilarach.....	54
2.11. Wyładowania mikrofalowe.....	58
2.12. Wyładowania łukowe .....	59
2.13. Podsumowanie .....	61
3. REAKTORY PLAZMY NIETERMICZNEJ .....	63
3.1. Reaktory z wyładowaniami barierowymi – ozonatory .....	64
3.1.1. Proces syntezy ozonu w wyładowaniach barierowych.....	66
3.1.2. Reaktor z wyładowaniami barierowymi jako odbiornik energii elektrycznej.....	68
3.1.3. Elektryczne i energetyczne parametry reaktorów z wyładowaniami barierowymi.....	71
3.2. Reaktory z wyładowaniami łukowymi .....	79
3.2.1. Reaktory plazmowe z łukiem ekspansyjnym.....	80
3.3. Reaktory ze ślizgającym się łukiem elektrycznym.....	82

3.3.1. Charakterystyki reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym .....	87
3.3.2. Cykl pracy reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym .....	94
3.4. Podsumowanie .....	102
4. UKŁADY ZASILANIA REAKTORÓW PLAZMOWYCH .....	103
4.1. Układy transformatorowe .....	105
4.2. Zintegrowany układ zasilania .....	106
4.2.1. Transformator pięciokolumnowy w układzie zasilania reaktorów łukowych .....	118
4.3. Układy zasilania reaktorów z wyładowaniami barierowymi .....	124
4.4. Układy Przekształtnikowe .....	129
4.5. Analiza mocy i sprawności wybranych transformatorowych układów zasilania reaktorów plazmowych .....	134
4.5.1. Moc i sprawność wybranych układów zasilania reaktorów z wyładowaniami barierowymi .....	135
4.5.2. Moc i sprawność wybranych układów zasilania reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym .....	138
4.6. Wybrane zagadnienia projektowania układów zasilania reaktorów plazmowych .....	140
4.7. Podsumowanie .....	143
5. MODELOWANIE MATEMATYCZNE REAKTORÓW ZE ŚLIZGAJĄCYM SIĘ WYŁADOWANIEM ŁUKOWYM .....	145
5.1. Przegląd modeli matematycznych wyładowań łukowych .....	147
5.2. Modelowanie ślizgającego się wyładowania łukowego .....	151
5.3. Modelowanie rozkładu temperatury w przestrzeni wyładowczej reaktora .....	160
5.4. Podsumowanie .....	169
6. ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII NIETERMICZNEJ PLAZMY W PROCESACH STERYLIZACJI .....	170
6.1. Obróbka gleby .....	173
6.2. Podsumowanie .....	189
Literatura .....	191
Skorowidz .....	209

## **Przedmowa**

Celem książki jest podanie podstaw wytwarzania i zastosowań nietermicznej plazmy generowanej wyładowaniami elektrycznymi w energetyce i inżynierii środowiska (oczyszczanie powietrza, wody, gleby, utylizacja odpadów). Książka zawiera wyniki wieloletnich badań prowadzonych w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii dotyczących zaawansowanych technologii wykorzystujących procesy elektromagnetyczne, elektrotermiczne i plazmowe. Wiele tych badań prowadzonych było we współpracy z ośrodkami naukowo-badawczymi w kraju i za granicą, wiele rozwiązań zostało opatentowanych i znalazło zastosowanie w praktyce przemysłowej. Ich uwieńczeniem było przyznanie Instytutowi Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii w 2003 roku, w 5. konkursie Ramowego Programu Unii Europejskiej, statusu Europejskiego Centrum Doskonałości Zastosowań Technologii Nadprzewodnikowych i Plazmowych w Energetyce ASPPECT (z ang. Application of Superconductivity and Plasma Technologies in Power Engineering), co świadczy o uznaniu wysokiego poziomu prowadzonych badań w zakresie tych technologii, ale przede wszystkim stanowi potwierdzenie ważności prowadzonych badań dla rozwoju technologicznego nie tylko naszego regionu, czy kraju ale także w wymiarze europejskim.

Wykłady z zastosowań technologii plazmy nietermicznej w energetyce i inżynierii środowiska były częściowo prezentowane przez autorkę książki w ramach przedmiotu Advanced Technology for Electrical Energy, podczas rocznego pobytu jako profesor wizytujący w Uniwersytecie Kumamoto w Japonii.

Japonia, która posiada znacznie ograniczone zasoby energetyczne, przywiązuje wielką wagę do oszczędnego nimi gospodarowania oraz ochrony środowiska naturalnego. W Uniwersytecie Kumamoto utworzono, ufundowaną przez Korporację Elektroenergetyczną Kyushu, katedrę Zawansowanych Technologii Inżynierii Elektrycznej, do której zaprasza-

ni byli rokrocznie specjaliści z całego świata, przekazując studentom japońskim swoje doświadczenia oraz najnowsze wyniki badań podczas wykładów oraz realizacji wspólnych projektów badawczych. Twórcom tej idei przyświecał cel szybkiego wdrożenia w Japonii wielu zaawansowanych technologii oraz rozwinięcia wspólnych badań i współpracy międzynarodowej w zakresie energooszczędnych i przyjaznych środowisku technologii. Jest to w obecnych czasach, gdy żadna z potęg światowych nie jest już samowystarczalna w produkcji energii, a zanieczyszczenia, będące wynikiem wytwarzania i przetwarzania energii nie mają granic i powodują globalne problemy środowiskowe, idea warta naśladowania, przez wszystkich, niezależnie od tego, gdzie pracujemy i żyjemy i jaki jest nasz udział w technologicznym rozwoju oraz zanieczyszczaniu środowiska naturalnego.

Intencją autorki jest, aby czytelnik zdobył podstawy wiedzy o technologiach wykorzystujących nietermiczną, nierównowagową plazmę, stosowaną we współczesnych procesach oczyszczania wody, powietrza i gleby.

Książka obejmuje krótkie omówienie podstaw zrównoważonego rozwoju energetyki (Rozdział 1). Przedstawiono problemy związane z jakością energii, stratami generowanymi na każdym etapie jej wytwarzania oraz wpływem procesów przetwarzania energii na środowisko. Rozdział 2 poświęcono przedstawieniu wpływu procesów technologicznych na stan wody, powietrza i gleb, jako najważniejszych elementów, niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania środowiska naturalnego. Zawarto w nim także przegląd najbardziej dokuczliwych obecnie substancji zanieczyszczających środowisko naturalne, z opisem ich wpływu na jakość wody, powietrza i gleb, zarówno w zakresie lokalnym jak i globalnym.

Podstawą wytwarzania plazmy dla celów technologicznych są wyładowania elektryczne, dlatego omówiono rodzaje wyładowań elektrycznych stosowanych w technologiach plazmowych i podstawowe zjawiska

im towarzyszące odsyłając zainteresowanych do pogłębienia wiedzy w bogatej literaturze dotyczącej wyładowań elektrycznych w gazach. Omówiono rodzaje stosowanych obecnie reaktorów plazmowych, głównie z punktu widzenia ich zastosowań w technologiach inżynierii środowiska, ale zwrócono także uwagę i przedstawiono podstawowe rozwiązania reaktorów plazmy łukowej stosowanych w technologiach obróbki materiałowej, jak cięcie, napyłanie czy topienie.

Reaktory plazmowe wykorzystywane dla celów technologicznych są bardzo nietypowymi odbiornikami energii elektrycznej i stawiają ich układom zasilania szczególne wymagania. Tym wymaganiom oraz stosowanym rozwiązaniom układów zasilania poświęcono rozdział 4. Jednemu z układów zasilania, zwanego zintegrowanym, którego współtwórczynią jest autorka książki, poświęcono nieco więcej uwagi (rozdz. 4.2) podając możliwe rozwiązania oraz zasady modelowania i projektowania reaktorów plazmowych zasilanych z układu zintegrowanego. Wybrane wyniki prac własnych autorki i zespołów badawczych, z którymi współpracowała w zakresie modelowania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, zawarto w rozdziale 5. Ostatni 6 rozdział poświęcono omówieniu wybranych zastosowań technologii nietermicznej plazmy w procesach sterylizacji i dezynfekcji. Przedstawiono w nim wyniki badań nad procesami sterylizacji gleby prowadzone we współpracy z Laboratorium Przemian Energii Uniwersytetu Kumamoto w Japonii. Są one przykładem wykorzystania technologii nietermicznej plazmy w inżynierii środowiska i biotechnologiach.

## **1. WPROWADZENIE DO PROBLEMÓW OCHRONY ŚRODOWISKA NATURALNEGO**

Ostatnie dwa stulecia niespotykanego wcześniej intensywnego rozwoju techniki i nieustannego wzrostu liczby ludności przyczyniły się do głębokich zmian środowiska naturalnego człowieka i znacznej jego degradacji. Zmiany te dotyczą w równym stopniu powietrza, wody i gleb i są efektem dynamicznego rozwoju gospodarki, w tym szczególnie energetyki i przemysłu chemicznego, których oddziaływanie objęło całą Ziemię.

Współcześnie nikt nie kwestionuje konieczności działań profilaktycznych i interwencyjnych mających zapobiec katastrofie ekologicznej a zadaniem specjalistów z różnych dziedzin nauki jest opracowanie programów oraz wskazanie najbardziej pilnych i trafnych przedsięwzięć mających na celu przeciwdziałanie dalszej degradacji środowiska naturalnego, bowiem to właśnie nauka i technologia, będące podstawą i motorem wszelkiego postępu, są też, w opinii ekologów i etyków, w dużym stopniu odpowiedzialne za zachwianie równowagi ekologicznej. Najbardziej spektakularne oznaki zachwiania tej równowagi są związane z zanieczyszczeniem powietrza atmosferycznego.

Jakość powietrza jest jednym z tematów szczególnej troski dla społeczeństw z krajów członkowskich Unii Europejskiej, które są aktywne w kreowaniu odpowiedniej strategii i zobowiązane do przyjmowania i implementacji nowych dyrektyw Komisji Europejskiej w zakresie ochrony powietrza, jako celów długoterminowych. Wydaje się prawdopodobne, że podobnie jak dostępność kapitału, zasoby ludzkie i infrastruktura techniczna, tak i jakość powietrza staną się czynnikiem determinującym wzrost ekonomiczny w danym regionie. Główne problemy globalne związane z jakością powietrza to: zmiany klimatu, kwaśne deszcze i ubytki warstwy ozonowej w atmosferze.



Zmiany klimatu ziemskiego były przez stulecia czymś naturalnym, jednak ludzka aktywność w ostatnich dwu stuleciach jest powodem „globalnego ocieplenia”. W wyniku uwalniania się znacznych ilości tzw. gazów cieplarnianych następują istotne zmiany absorpcji i emisji promieniowania słonecznego w atmosferze ziemskiej. Ubytki w warstwie ozonowej, która chroni Ziemię przed niebezpiecznym promieniowaniem ultrafioletowym, obserwuje się od ponad 25 lat [1]. Są one wynikiem działalności przemysłowej (chłodnictwo, produkcja aerozoli i rozpuszczalników), chemizacji rolnictwa i spalania biomasy.

Kwaśne substancje przenikające do gleby i wód gruntowych oddziałują na florę i faunę. Wiele z tych substancji, powstających na skutek przemysłowej aktywności człowieka, może być przenoszonych przez wiatr tysiące kilometrów od miejsc, w których zostały wytworzone. W wielu ekosystemach poziom kwaśnych substancji znacznie przewyższa normy. Szacuje się, że w krajach skandynawskich [1] ok. 20% lasów i jezior jest martwych a kolejne 30% zagrożonych, głównie wskutek zanieczyszczeń pochodzących z innych państw.

Wykorzystując właściwie zjawiska elektromagnetyczne można rozwiązać wiele problemów związanych z zanieczyszczeniem środowiska naturalnego. Technologie bazujące na energii elektrycznej są ekologicznie „czyste” a zatem bezodpadowe, w przeciwieństwie do większości technologii chemicznych. Dzięki już stosowanym, na skalę przemysłową, technologiom elektromagnetycznym, takim jak: ozonowanie wody, elektrofiltracja pyłów zawartych w spalinach, separacja magnetyczna, udało się częściowo zahamować postępującą degradację środowiska. Wiele nowopowstałych technologii elektromagnetycznych oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń gazowych, wśród których wymienimy: procesy zachodzące w nietermicznej plazmie, technologie laserowe, technologie wykorzystujące wiązkę elektronową („electron-beam”) znalazły już zastosowanie na skalę przemysłową [2]. Polityka krajów Unii Europejskiej począwszy od lat 80-tych wiele miejsca poświęca środowisku naturalnemu i jego

zasobom oraz jest inicjatorem akcji w krajach członkowskich i stowarzyszonych na rzecz jego ochrony. Działania te dotyczą bardzo szerokiego zakresu inicjatyw i instrumentów, skierowanych do możliwie szerokich grup społecznych, i obejmują uregulowania prawne oraz instrumenty finansowe, w postaci priorytetów dla interdyscyplinarnych programów badawczych. Jednym z takich instrumentów są programy ramowe. Kolejny już 7. Ramowy Program Unii Europejskiej, podobnie jak dwa poprzednie, zawiera priorytety dla badań w zakresie zrównoważonego rozwoju energetyki oraz ochrony środowiska naturalnego.

Badania dotyczące zaawansowanych technologii wykorzystujących procesy elektromagnetyczne, elektrotermiczne i plazmowe były prowadzone w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii od wielu lat i zaowocowały w 2003 roku przyznaniem Instytutowi w konkursie 5 Ramowego Programu Unii Europejskiej, statusu Europejskiego Centrum Doskonałości Zastosowań Technologii Nadprzewodnikowych i Plazmowych w Energetyce ASPPECT. Świadczy to o ważności prowadzonych badań w zakresie tych technologii dla rozwoju nie tylko naszego regionu i kraju, ale także w wymiarze europejskim. Wiele tych badań prowadzonych było we współpracy z ośrodkami naukowo-badawczymi w kraju i za granicą, wiele rozwiązań zostało opatentowanych i znalazło zastosowanie w praktyce przemysłowej.

Problematyka badawcza prowadzona w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, w ramach zaawansowanych technologii plazmowych w ochronie środowiska, została zapoczątkowana we wczesnych latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku badaniami nad układami zasilania ozonatorów. Ta bardzo dojrzała technologia, wykorzystująca do wytwarzania plazmy ciche wyładowania elektryczne w układach elektrodowych z barierą dielektryczną, stosowana jest również do bielienia tkanin i papieru i unieszkodliwiania ścieków. Prowadzi się także badania nad jej wykorzystaniem do oczyszczania gazów zawierających związki siarki, węgla, lotne substancje organiczne, węglowodory i inne. Reaktory

plazmowe z wyładowaniami niezupełnymi (barierowymi) stosowane w technologiach uzdatniania wody pitnej są dużej mocy odbiornikami energii elektrycznej, charakteru rezystancyjno-pojemnościowego, wymagającymi od elektrycznego układu zasilania energii o wysokim napięciu, często o podwyższonej częstotliwości oraz symetryzacji i kompensacji niskiego współczynnika mocy. Układy zasilania tych specjalnych odbiorników energii, oprócz spełnienia powyższych wymagań, powinny zapewnić sprawną, bezawaryjną pracę i dobrą współpracę z siecią zasilającą. Jednym z takich układów został zastosowany w praktyce, zastępując stosowany wówczas do zasilania generatora ozonu układ z przetwornicą dwumaszynową [3].

Badania nad układami zasilania reaktorów plazmowych kontynuowano we współpracy z Uniwersytetem w Orleanie, we Francji, w którym powstała idea reaktora z wyładowaniami zwanymi w literaturze angielskiej „gliding arc”, a któremu ich twórcy nadali technologiczną nazwę „GlidArc” [4, 5]. Ślizgające się wyładowania łukowe jako technologiczne źródło nietermicznej plazmy wykorzystywane są głównie do oczyszczania gazów wylotowych elektrowni z zawartych w nich związków siarki, azotu i węgla oraz do neutralizacji lotnych substancji organicznych (z ang. VOC – volatile organic compounds). Główną ich zaletą jest możliwość wytwarzania zimnej nierównowagowej plazmy bezpośrednio w zanieczyszczonym gazie przy ciśnieniu atmosferycznym, a zatem w takich warunkach, w jakich emitowane są do atmosfery gazy wylotowe elektrowni opalanych węglem kamiennym i innymi paliwami kopalnymi. Współpraca z uniwersytetem w Orleanie, zaowocowała opracowaniem idei transformatorowych układów zasilania reaktorów ze ślizgającymi się wyładowaniami łukowymi, zwanych zintegrowanymi, które zostały opatentowane [6] i stały się podstawą do budowy kilkunastu zasilaczy, pracujących obecnie w laboratoriach w Polsce, m.in. w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej,

w Instytucie Chemii Przemysłowej w Warszawie, Przemysłowym Instytucie Elektroniki oraz we Francji.

Zanim omówione zostaną problemy związane z ochroną środowiska naturalnego, w rozwiązywaniu których technologie plazmowe mogą odegrać, bądź już odgrywają, istotną rolę, przedstawione zostaną w dużym skrócie główne założenia idei zrównoważonego rozwoju, zwłaszcza w odniesieniu do energetyki, której systemy stanowią niezwykle ważną część infrastruktury wszystkich państw a energia jest niezbędną we wszystkich procesach technologicznych.

Pierwsze sygnały o zagrożeniu środowiska naturalnego opublikowano w raporcie „Człowiek i jego środowisko” ogłoszonym przez Sekretarza Generalnego ONZ U'Thant'a na posiedzeniu ONZ w 1967 r, a więc ponad 40 lat temu [7]. Zdaniem ówczesnych, kryzys w relacjach człowiek-środowisko osiągnął wymiar globalny, obejmując swym zasięgiem nie tylko kraje wysoko uprzemysłowione ale i rozwijające się. Wtedy też zaczęto formułować założenia filozofii zrównoważonego rozwoju, które ukazały się w Deklaracji Sztokholmskiej z 1972 r. [8]. Minęło kolejne 20 lat i na konferencji ONZ w Rio de Janeiro w 1992 r. (z ang. United Nations Conference on Environment and Development – UNCED) jednoznacznie potwierdzono i zwrócono uwagę na głębokie i o globalnym zasięgu zmiany środowiska naturalnego człowieka. W dokumencie Agenda 21 Konferencji z Rio de Janeiro sformułowano program działań dla zapewnienia zrównoważonego rozwoju i większość przedstawicieli rządów krajów uczestniczących w konferencji poparła tę strategię. W części dotyczącej rozwoju systemów energetycznych czytamy [9]:

*"The need to control atmospheric emissions of greenhouse and other gases and substances will increasingly need to be based on efficiency in energy production, transmission, distribution and consumption, and on growing reliance on environmentally sound energy systems, particularly new and renewable sources of energy."* – co w tłumaczeniu znaczy: “Kontrola emisji do atmosfery gazów cieplarnianych oraz innych gazów

i substancji musi bazować na usprawnianiu systemów wytwarzania, przesyłania, dystrybucji i przetwarzania energii oraz na rosnącym wykorzystaniu przyjaznych dla środowiska systemów energetycznych, a w szczególności nowych i odnawialnych źródeł energii”.

### 1.1. Energetyka i zrównoważony rozwój

Zrównoważony rozwój to filozofia działania i proces podejmowania decyzji, zgodnie z którymi zaspokojenie potrzeb obecnych pokoleń powinno następować w sposób nie naruszający możliwości zaspokojenia tych potrzeb przyszłym pokoleniom. A zatem, obecnie podejmowane decyzje muszą być oparte na takich istniejących rozwiązaniach lub ich poszukiwaniu, które będą uwzględniały trzy najważniejsze elementy określające jakość naszego życia: *zdrowie i dobrobyt, gospodarowanie zasobami* oraz *środowisko*, w którym żyjemy. Jeśli te trzy elementy będą się we wszelkich naszych działaniach wzajemnie "przenikały" i uzupełniały, to idea zrównoważonego rozwoju spełni się i przyszłe pokolenia będą mogły, w równym stopniu jak obecne, korzystać z ziemskich zasobów i środowiska naturalnego.



Rys. 1.1. Ilustracja idei zrównoważonego rozwoju („sustainable development”)

Idea zrównoważonego rozwoju, którą schematycznie przedstawia rysunek 1.1, to zatem taki sposób gospodarowania ziemskimi zasobami,

aby zaspokoić obecne i przyszłe potrzeby pokoleń oraz zapewnić harmonię między rozwojem i potrzebą ochrony środowiska naturalnego. Aby zrealizować w praktyce zasady zrównoważonego rozwoju należy [10]:

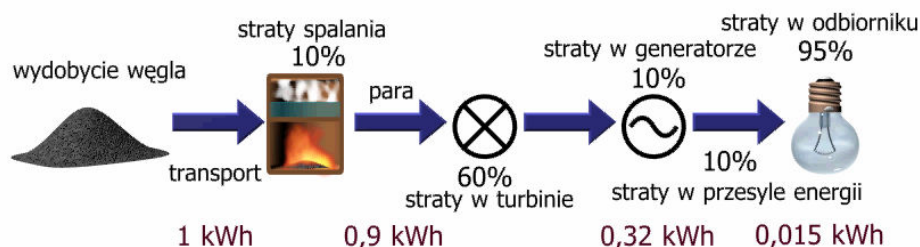
- efektywnie i wydajnie wykorzystywać zasoby energetyczne,
- uczestniczyć w podejmowaniu decyzji dotyczących zrównoważonego rozwoju,
- zapewnić masowy i równy dla wszystkich dostęp do informacji,
- zintegrować procesy podejmowania decyzji i planowania,
- dążyć do minimalizacji strat i odpadów,
- rozwijać badania i innowacje.

Powyższe kierunki prowadzące do realizacji zasad zrównoważonego rozwoju odnoszą się w równym stopniu do każdej aktywności człowieka, niemniej jednak, w energetyce nabierają one szczególnego znaczenia.

W każdym systemie energetycznym jego końcowy produkt – energia – jest wynikiem wielu następujących po sobie przemian energetycznych, wykorzystujących różnorodne jej nośniki, takie jak ciepło, elektryczność, paliwa czy energię mechaniczną. Zwykle, jako źródła energii rozumiemy pierwotne, występujące w naturze nośniki energii (paliwa stałe, ciekłe i gazowe, energię słońca, wody, wiatru, pływów morskich).

Energia w systemie ulega zatem wielu przemianom, od wydobycia nośnika energetycznego, poprzez jego transport, dystrybucje i wielokrotne konwersje aż do uzyskania energii w postaci końcowej. Ten łańcuch przemian rodzi wiele problemów związanych ze stratami energii, degradacją jej jakości oraz przyczynia się do zanieczyszczenia środowiska.

Na rysunku 1.2, opracowanym na podstawie [11], przedstawiono przykład takiego łańcucha przemian od wydobycia paliwa do uzyskania energii w bardzo prostym jej odbiorniku, jakim jest żarówka, ale powszechnym i niezbędnym w naszym codziennym życiu. Widać z niego, jak wielkie potencjalne możliwości usprawnienia na każdym etapie procesu generacji energii elektrycznej wciąż istnieją.



Rys. 1.2. Przykład procesu energetycznego

Z jednej kilowatogodziny paliwa kopalnego uzyskujemy w efekcie jedynie kilkadziesiąt watogodzin energii świetlnej. Straty energii podczas wydobycia, przemian i przesyłu oraz w samym odbiorniku stanowią ponad 90% energii pierwotnej, zaś spalanie nieodnawialnych paliw kopalnych jest źródłem zanieczyszczenia środowiska naturalnego.

Reasumując, należy stwierdzić, że współczesne systemy energetyczne nie są zrównoważone. W większości bazują na wytwarzaniu energii ze źródeł nieodnawialnych. Znaczna część energii zawartej w paliwie jest tracona bezpowrotnie (straty energii i niska jej jakość), a emisja do atmosfery produktów spalania paliw kopalnych powoduje zanieczyszczenie środowiska naturalnego.

Technologie plazmowe mogą przyczynić się do poprawy tej sytuacji zwłaszcza w zakresie ograniczania emisji zanieczyszczeń gazowych generowanych w procesach energetycznych.

W następnym rozdziale omówiono problemy związane z czystością powietrza atmosferycznego, wody i gleb, głównych składników środowiska naturalnego człowieka.

## 1.2. Problemy zanieczyszczenia środowiska naturalnego

Środowisko naturalne człowieka jest we współczesnym świecie poddawane ciągłej degradacji. Dotyczy to jego trzech głównych składników, tj. powietrza, wody i gleb. Gwałtowny rozwój technologiczny rozpoczęty

u schyłku XIX wieku spowodował, że obecnie świat boryka się z wieloma problemami, do których zaliczamy:

- malejące zasoby naturalne,
- zanieczyszczanie powietrza, wody i gleb,
- niebezpieczne i radioaktywne odpady,
- zmiany klimatyczne i globalne ocieplenie,
- kwaśne deszcze,
- okresowe braki ozonu w atmosferze,
- smog elektromagnetyczny,
- hałas.

Tabela 1.1. Problemy środowiska – zjawiska, sprawcy i efekty [1]

Zjawisko	Główni sprawcy	Efekty uboczne
Zmiany klimatyczne	- dwutlenek węgla (CO <sub>2</sub> ) pochodzący z procesów energetycznych, przemysłowych i transportu - metan (CH <sub>4</sub> ), z wytwarzania i użytkowania energii, rolnictwa, nawozów sztucznych - tlenek azotu (N <sub>2</sub> O) z uprawy gleb, spalania biomasy oraz paliw kopalnych - chlorofluorokarbony (CFCs) z działalności przemysłowej, chłodnictwa, produkcji aerozoli	- podnoszenie się poziomu mórz - ekstremalne zjawiska klimatyczne takie jak: powodzie, susze oraz niespotykanej siły sztormy
Braki ozonu w atmosferze	- chlorofluorokarbony - hydrochlorofluorokarbony (HCFCs) - bromek metylu, z działalności rolniczej i spalania biomasy	- zwiększona zachorowalność na raka - uszkodzenie ekosystemów morskich
Kwaśne deszcze	- dwutlenek siarki (SO <sub>2</sub> ) oraz tlenki azotu (NO <sub>x</sub> ) pochodzące ze spalania paliw kopalnych - amoniak (NH <sub>3</sub> ) z działalności rolniczej	- śmierć ryb i roślin na skutek przebywania w kwaśnym środowisku - uszkodzenie konstrukcji i materiałów budowlanych - łatwiejsze przedostawanie się metali ciężkich i związków azotu do wód gruntowych



W tabeli 1.1 przedstawiono efekty uboczne i sprawców trzech najbardziej spektakularnych patologii środowiska naturalnego (zmian klimatycznych, okresowych braków ozonu w górnych warstwach atmosfery i kwaśnych deszczy) obserwowanych w ostatnich dziesięcioleciach wskutek intensywnego rozwoju technologicznego.

Wynikają one w większości z wytwarzania, dystrybucji oraz wielokrotnych konwersji energii. Ponad 2/3 światowej energii elektrycznej wytwarza się poprzez spalanie, którego produkty i ich emisja do atmosfery są przyczyną niekorzystnych dla środowiska zjawisk o lokalnym i globalnym zasięgu.

### **1.3. Zanieczyszczenia powietrza**

Zanieczyszczenie powietrza jest największym problemem środowiska, bowiem produkty spalania w postaci lotnych związków węgla, siarki, azotu przenoszone są często wraz z wiatrem w odległe od miejsca wytworzenia regiony. Tam, reagując z zawartą w atmosferze wilgocią, tworzą kwasy i dostają się wraz z opadami atmosferycznymi do wód powierzchniowych, powodując zakwaszenie środowiska, uszkadzając roślinność i oddziałując niekorzystnie na zasoby wodne i gleby.

Największy udział w wytwarzaniu gazowych i stałych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego mają transport, generacja energii, ogrzewanie i spalanie odpadów, co przedstawiono poniżej (w nawiasach podano procentowy udział aktywności technologicznej w globalnym zanieczyszczeniu) [12, 13]:

- transport (60%) – tlenki azotu, węgla i związki siarki oraz zanieczyszczenia stałe są prekursorami kwaśnych deszczy, a globalna emisja CO<sub>2</sub> wzrosła w ciągu ostatnich 30 lat o ponad 20%,
- przemysł (16%) – jest źródłem zanieczyszczeń o wielkiej różnorodności, największe ich ilości generuje przemysł metalurgiczny, cementowy i chemiczny,

- generacja energii (15%) – w latach 90-tych ubiegłego wieku procentowe wykorzystanie źródeł naturalnych kształtowało się następująco: ropa naftowa – 32%, węgiel – 26%, gaz naturalny – 17%, biomasa – 14%, energia wody – 6%, energia jądrowa – 5%,
- ogrzewanie (6%),
- spalanie odpadów (3%).

Ponad 90% wszystkich substancji uwalnianych do atmosfery podczas wymienionych procesów ma postać gazową.

W Polsce energia pierwotna jest w 78% wytwarzana poprzez spalanie węgla, w 4% pochodzi ze spalania ropy naftowej a tylko w 8% z innych źródeł. Zanieczyszczenie środowiska produktami spalania paliw konwencjonalnych jest jednym z większych w Europie, a wśród krajów regionu bałtyckiego zajmujemy niechlubne drugie miejsce po Niemczech.

Substancje zanieczyszczające powietrze dzielimy na lotne i stałe, oraz organiczne i nieorganiczne. Wyróżniamy następujące grupy tych związków:

- Związki węgla – tlenek i dwutlenek węgla (CO, CO<sub>2</sub>), organiczne związki węgla – węglowodory. Związki węgla odpowiedzialne są za, wymieniony na wstępie tego rozdziału, efekt cieplarniany. Wytwarzanie dwutlenku węgla oraz lotnych substancji organicznych VOC rośnie w szybkim tempie i powoduje dostawanie się do środowiska olbrzymich ilości węgla, głównie na skutek spalania paliw stałych a w mniejszym stopniu w wyniku zużycia łądów i zmniejszenia się powierzchni lasów (z ang. deforestation). W połowie lat 90 [13] wyemitowano do środowiska 9,3 Gt węgla, z czego 5,5 Gt w wyniku procesów spalania paliw kopalnych oraz 1,6 Gt na skutek kurczenia się powierzchni lasów. Organiczne związki węgla, zawierające chlor, jod, brom oraz fluor, nie występowały w atmosferze w czasach przed-industrialnych i są głównym powodem okresowych braków ozonu w górnych warstwach atmosfery (ozonosferze), a także globalnego ocieplenia.

- Związki siarki – tlenki siarki ( $\text{SO}_x$ ), siarkowodór ( $\text{H}_2\text{S}$ ), kwasy siarkawy i siarkowy ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) – należą do głównych substancji zanieczyszczających środowisko. Wytwarzane w procesach spalania paliw kopalnych i innych związków zawierających siarkę w obecności pary wodnej tworzą kwasy, które są przyczyną kwaśnych deszczy. 60% emitowanych tlenków siarki  $\text{SO}_x$  jest wynikiem spalania węgla, 14% pochodzi ze spalania olejów kopalnianych zaś 22% wytwarzają przemysł metalurgiczny i chemiczny [13].
- Związki azotu – tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), amoniak ( $\text{NH}_3$ ). Powstają zazwyczaj w procesach spalania w wysokiej temperaturze. Znaczna ich część (60%) jest wynikiem naturalnego uwalniania się azotu z mórz i lądów, 15% jest wynikiem spalania paliw kopalnych, 10% spalania biomasy a pozostałe 15% pochodzi z używania nawozów azotowych.
- Zanieczyszczenia stałe (tzw. nierozpuszczalne) – pyły, sadze, popiół węglowy, smary, wapno, tlenki metali, azbest, związki krzemu ( $\text{SiO}_2$ ), antymon, cynk, izotopy radioaktywne. Zanieczyszczenia stałe mogą mieć różne wymiary, od 30  $\mu\text{m}$  do 0,01  $\mu\text{m}$  i mniejsze. Większe cząsteczki osiadają szybko na powierzchni ziemi, ale mniejsze długo zatrzymują się w atmosferze, tworząc aerozole [12]. Klasyfikację zanieczyszczeń powietrza oraz ich skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1.2.

Tabela 1.2. Klasyfikacja zanieczyszczeń powietrza

Rodzaj zanieczyszczenia	Skład chemiczny
Substancje gazowe organiczne	Hydrokarbony, terpeny, merkaptany, formaldehydy, dioxyny, fluorokarbony
Substancje gazowe nieorganiczne	Dwutlenek siarki, siarkowodór, tlenki azotu, kwas solny, trójfluorek krzemu, tlenek i dwutlenek węgla, amoniak, ozon
Substancje stałe organiczne	Pyły, sadze, popioły lotne
Substancje stałe nieorganiczne	Wapno, tlenki metali, krzem, antymon, cynk, izotopy radioaktywne i inne

Szeroko stosowaną technologią usuwania stałych zanieczyszczeń powietrza jest elektrofiltracja, wykorzystująca właściwości elektrostatyczne mikrocząstek pyłów oraz mechanizmy oddziaływania na nie polem elektrostatycznym.

#### **1.4. Problemy zanieczyszczenia wody i gleb**

Zasoby wody i jej jakość mają fundamentalne znaczenie dla życia na ziemi oraz wszelkiej aktywności. Główne problemy z jakością wody związane są z zanieczyszczeniami biologicznymi i chemicznymi. Zanieczyszczenia biologiczne to bakterie, wirusy i niektóre organizmy wyższego rzędu występujące w wodzie naturalnie bądź będące efektem działalności człowieka. Mogą być one źródłem chorób i epidemii o znacznym zasięgu.

Zanieczyszczenia chemiczne generowane podczas procesów przemysłowych, działalności rolniczej czy gospodarki gruntami i odpadami mają postać osadów z substancji toksycznych, nawozów i ścieków i są przyczyną zanieczyszczenia gleb.

Obserwujemy wiele przykładów niekorzystnego wpływu technologii i aktywności ludzkiej na jakość wody, który obejmuje wielkie obszary i ogromne ilości zbiorników wodnych. Jednym z takich zjawisk są odpady przemysłowe i komunalne, w tym również toksyczne, których składowanie, unieszkodliwianie i utylizacja powodują zanieczyszczanie powietrza, wód powierzchniowych i podziemnych oraz gruntów.

Gleba i grunty poddawane są także niekorzystnym oddziaływaniom związanym z aktywnością rolniczą i stosowaniem nawozów sztucznych, co istotnie przyczynia się do pogorszenia ich biologicznej i chemicznej jakości.

Obróbka gleby, w celu usunięcia szkodliwych bakterii, grzybów, pleśni oraz zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych jest prowadzona metodami fizycznymi (wysoka temperatura, promieniowanie UV,

mikrofale, ultradźwięki), chemicznymi (chlor, bromek metylu, nadtlenek wodoru, podchloryn sodu, ozon, brom, jod) oraz biologicznymi (mikroorganizmy i szczepy bakteryjne wytwarzające enzymy i środki powierzchniowo czynne). Wszystkie metody są w większym bądź mniejszym stopniu stosowane w laboratoriach badawczych i w praktyce. Metody chemiczne są szkodliwe dla środowiska i dąży się do ograniczenia ich stosowania, zwłaszcza w krajach wysoko uprzemysłowionych, które zobowiązały się (deklaracja w Montrealu) do zakończenia stosowania bromku metylu ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ), jako substancji do sterylizacji gleby, do 2005 r. Bromek metylu jest uważany za substancję odpowiedzialną za długofalowe efekty zanieczyszczenia środowiska, w tym za uszkodzanie warstwy ozonowej. Stąd potrzeba poszukiwania alternatywnych metod sterylizacji gleby i zainteresowanie metodami plazmowymi, zwłaszcza wytwarzanym podczas wyładowań elektrycznych w powietrzu lub tlenie, ozonem, którego silne właściwości sterylizacyjne i bakteriobójcze są znane i wykorzystywane od dawna w procesach obróbki wody i ścieków.

Poważnym problemem ostatnich stuleci są odpady toksyczne, w tym poszpitalne. Wiele z tych odpadów jest składowanych pod ziemią bądź zatapianych. Budowanie nowych wysypisk śmieci nie rozwiązuje problemu. Jednym z wielu rozwiązań może być wykorzystanie reaktorów plazmowych do utylizacji toksycznych odpadów stałych. Za pomocą tej technologii można także unieszkodliwiać zanieczyszczenia gazowe generowane w procesach spalania odpadów. Badania w tym zakresie prowadzone są na dużą skalę w m. in. w Politechnice Łódzkiej [15÷18]. Dotyczą one utylizacji odpadów stałych za pomocą wyładowań łukowych, która prowadzi do termicznego rozkładu frakcji organicznej i stopienia frakcji nieorganicznej materiału odpadowego, co w procesie chłodzenia powoduje jego witrifikację (zeszkliwienie). Przykładem takiego procesu jest utylizacja popiołów i odpadów sedymentacyjnych. W temperaturze plazmy łukowej (około 2300 K [18]) następuje stopienie popiołu, który po schłodzeniu uzyskuje strukturę szkła. Wiele materiałów odpadowych

można poddać witrifikacji plazmowej. Należą do nich pozostałości procesów spalania (popioły, żużle, osady sedimentacyjne), nieorganiczne odpady niebezpieczne (azbest), przemysłowe odpady ściekowe (pozostałości galwaniczne). Do najważniejszych zalet procesu witrifikacji zalicza się [15÷18]:

- uwolnienie produktu ze związków organicznych i ich destrukcja,
- rozpuszczenie lub zamrożenie elementów i związków toksycznych (metali ciężkich) w zeszkłonym produkcie,
- redukcję masy i objętości w procesie odgazowania i rozpadu tlenków,
- odporność uzyskanego produktu na działanie związków organicznych oraz jego dobre właściwości fizyczne (twardość, odporność na ścieranie i wysokie temperatury).

## **1.5. Podsumowanie**

Postępujący wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną niesie ze sobą również wyzwania dla przemysłu elektroenergetycznego, aby rozwijać technologie pozwalające na sprawną i zgodną z wymogami środowiska naturalnego generację energii elektrycznej.

Współcześnie, największe potencjalne możliwości tkwią w wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii, w tym w szczególności energii słonecznej. Kolejne, to poprawa sprawności konwencjonalnych systemów generacji elektryczności, poprzez zastosowanie kogeneracji ciepła i energii elektrycznej. Wielkie nadzieje pokłada się w zastosowaniu ogniw paliwowych oraz nadprzewodnikowych systemów gromadzenia energii elektrycznej [19, 20]. Dzięki właściwemu wykorzystaniu różnorodnych technologii, w szczególności chemicznych i elektromagnetycznych, emisja szkodliwych związków została częściowo zahamowana, ale wciąż wiele problemów czeka na rozwiązanie a technologie plazmowe mogą przyczynić się do poprawy tej sytuacji.

## 2. TECHNOLOGIE PLAZMOWE

Wykorzystanie technologiczne plazmy zostało zapoczątkowane jeszcze w dziewiętnastym wieku przez braci Simens – Wenera i Williama, którzy zbudowali odpowiednio w 1857 r. pierwszy ozonator a w 1878 r. elektryczny piec łukowy. Niedługo potem, (Nicea 1907 r., San Petersburg 1908 r.), wprowadzono do technologii oczyszczania wody reaktory plazmowe z wyładowaniami barierowymi. W większości krajów świata ta technologia wykorzystywana jest do dzisiaj. Zalety ozonu w stosunku do innych znanych i wykorzystywanych utleniaczy chemicznych, takich jak chlor czy fluor, sprawiają, że technologia ozonowania nie ma na razie alternatywy.

Współczesne zastosowania plazmy i reaktorów plazmowych dzieli się na dwie zasadnicze grupy: zastosowania analityczne (spektrometria analityczna, chemiczna i optyczna) oraz zastosowania technologiczne (technologie materiałowe, chemiczne, ochrony środowiska, biotechnologie). Podstawą podziału zastosowań plazmy dla celów technologicznych jest jej oddziaływanie na cząsteczki gazu, którego skutkiem jest zmiana właściwości chemicznych, pędu i energii cząstek plazmy. Transformacja właściwości fizycznych i chemicznych cząstek plazmy jest podstawą technologii chemicznych, takich jak: modyfikacja powierzchni, wytrawianie, osadzanie cienkich warstw, wytwarzanie proszków, generacja ozonu, plazmowe oczyszczanie gazów i ścieków, termiczna utylizacja odpadów i inne. Transformacje pędu i energii cząstek plazmy wykorzystuje się praktycznie do uzyskiwania wiązek plazmy dla celów technologii laserowych, napędów raketowych, do generacji promieniowania oraz w plazmowych źródłach światła.

W praktyce przemysłowej metalurgia oraz plazmowe źródła światła należą do najstarszych, ale wciąż z powodzeniem stosowanych technologii plazmowych.

Ostatnie dekady dwudziestego wieku to kolejny renesans metod plazmowych i nowe zastosowania dla wykorzystywanych już wyładowań elektrycznych, które zawsze były głównym źródłem plazmy dla celów technologicznych. Należą tu tak wielkie obszary zastosowań, jak: mikroelektronika, technologie wytwarzania materiałów półprzewodnikowych, nadprzewodnikowych, organicznych, bio- i nanomateriałów. Dwudziesty pierwszy wiek to, zdaniem wielu uczonych, era nowych materiałów i technologii ich wytwarzania, które bazują obecnie w większości na technologiach plazmowych i laserowych. Te ostatnie są ściśle związane z plazmą, stanowiącą często medium wzmacniające wiązkę laserową (pompowanie laserów) i są zaliczane wprost do technologii plazmowych.

Plazma nietermiczna, generowana za pomocą wyładowań elektrycznych, jest coraz częściej stosowana w biotechnologiach jako medium umożliwiające prowadzenie procesów biochemicznych przy ciśnieniu atmosferycznym, w temperaturach otoczenia i bez szkodliwych dla środowiska odpadów.

## **2.1. Właściwości i podział plazmy**

Plazma jest podstawowym stanem skupienia materii wszechświata. Gwiazdy, mgławice i materia międzygwiazdowa znajdują się w stanie plazmowym i szacuje się, że 99,9% jego masy znajduje się w tym stanie [20, 21, 22]. W warunkach ziemskich naturalne występowanie plazmy jest stosunkowo rzadkie. Gruba powłoka gazowa atmosfery ziemi pochłania znaczną część promieniowania jonizującego, natomiast, podobnie jak inne ciała niebieskie z atmosferą gazową, nasza planeta posiada zewnętrzną zjonizowaną (plazmową) powłokę zwaną jonosferą. Innym naturalnym źródłem powstawania plazmy w warunkach ziemskich są wyładowania atmosferyczne.

Zasadnicze znaczenie dla występowania plazmy w warunkach ziemskich mają współcześnie technologiczne źródła plazmy oraz procesy ge-



nerujące plazmę jako efekt uboczny (badania nuklearne, silniki odrzutowe i raketowe, materiały wybuchowe).

Historia badań plazmy sięga połowy wieku osiemnastego, jednak pojęcie plazmy zostało wprowadzone po raz pierwszy przez amerykańskiego naukowca Irvinga Langmuira w 1923 roku.

Plazma, zwana czwartym stanem skupienia materii, ze względu na odmienne od fazy stałej, ciekłej i gazowej właściwości, powstaje w temperaturach, w których średnia energia kinetyczna cząstek przekracza wartość potencjału jonizacyjnego. Za granicę oddzielającą stan gazowy i plazmę uznaje się moment zmiany właściwości fizycznych gazu, wśród których pojawienie się przewodnictwa elektrycznego i towarzysząca temu utrata zdolności izolacyjnych są jednymi z najistotniejszych. Jest to stan skupienia o najszerszym paśmie energii cząstek. Elektrony częściowo lub całkowicie odrywają się od atomów i poruszają się niezależnie od powstałych w ten sposób jonów dodatnich. Próby zdefiniowania pojęcia plazmy podejmowane były przez wielu badaczy. Plazma to przewodzący gaz na tyle zjonizowany, że decyduje to o jego właściwościach makroskopowych, przy czym jony dodatnie i elektrony występują w takich proporcjach, że wypadkowy ładunek jest równy zeru. Plazma zatem to zjonizowany gaz będący kwasi-neutralną mieszaniną swobodnych jonów dodatnich i elektronów, a zakłócenia neutralności pojawiają się jedynie w bardzo małej objętości plazmy i w krótkich czasach [23, 24].

Stopień jonizacji i skład plazmy są bardzo zróżnicowane. W niskich temperaturach zachodzi proces odrywania pojedynczych elektronów, tzw. jonizacja jednokrotna. Mówimy wówczas o plazmie częściowo zjonizowanej, w której występuje pewna liczba jonów dodatnich, elektronów i duża liczba niezjonizowanych cząsteczek gazu. Wzrost temperatury powoduje silniejszą jonizację gazu, tzw. wzmożoną jonizację jednokrotną oraz jonizację wielokrotną polegającą na oddzieleniu wielu elektronów od atomu. W bardzo wysokich temperaturach zachodzi jonizacja zupełna a plazma staje się mieszaniną jonów dodatnich i elektronów bez udziału

cząstek neutralnych. W gazach wielocząsteczkowych, do prostych procesów jonizacji, dochodzi zjawisko dysocjacji, tj. rozbijania struktur wielocząsteczkowych na pojedyncze atomy. Jonizacja pewnych związków chemicznych w zakresie niskich temperatur w plazmie może prowadzić do pojawienia się także jonów o ładunku ujemnym.

Plazma występuje w bardzo szerokim zakresie energii cząstek wynoszącym od 0,2 eV do 2 MeV. Stany o jeszcze wyższych energiach są teoretycznie przewidywalne i podejmowane są próby ich badania [25]. Podstawową klasyfikacją plazmy w zastosowaniach technologicznych jest podział na:

- plazmę niskotemperaturową, nietermiczną, zwaną potocznie „zimną” lub plazmą wyładowań elektrycznych,
- wysokotemperaturową, „gorącą”, wytwarzaną podczas syntezy termojądrowej (tzw. fuzji plazmowej).

Plazma gorąca występuje w zakresie energii powyżej kilkunastu eV, jest zwykle prawie całkowicie zjonizowana, a jej źródłem w warunkach ziemskich są reakcje termojądrowe.

W technice wykorzystuje się przede wszystkim plazmę niskotemperaturową, ale opanowanie reakcji fuzji termojądrowej i zastosowanie gorącej plazmy do wytwarzania energii jest przedmiotem zaawansowanych badań w laboratoriach europejskich, amerykańskich i japońskich i daje nadzieję na rozwiązanie problemów energetycznych Świata.

Przyjmuje się, że plazma zimna występuje w zakresie energii od 0,2 eV do 3 eV, co odpowiada w przybliżeniu zakresowi temperatur od 2000 K do 30 000 K ( $1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$ ). Plazma niskotemperaturowa jest najczęściej gazem zjonizowanym w niewielkim stopniu, o dużej lub bardzo dużej zawartości cząstek neutralnych. Znaczenie tych cząstek, np: w procesie zderzeń, jest decydujące dla zachowania się plazmy tego rodzaju.

Inna klasyfikacja dzieli plazmę na:

- niskociśnieniową,
- wysokociśnieniową (termiczną).

Plazma niskociśnieniowa występująca najczęściej przy ciśnieniu atmosferycznym lub niższym (jej przykładami przy ciśnieniu poniżej 100 Pa są: materia międzygwiazdowa, jonosfera, rury jarzeniowe; a przy ciśnieniu atmosferycznym – plazmotrony łukowe specjalnej konstrukcji), znajduje się w stanie braku równowagi termodynamicznej a temperatury poszczególnych cząstek są różne.

Plazma wysokociśnieniowa występuje przy ciśnieniach powyżej 100 kPa (wnętrze kolumny łukowej, palniki wysokotemperaturowe, materia słoneczna). Jest ona, w większości wymienionych zjawisk i reaktorów, plazmą termiczną, lub w warunkach ziemskich zbliżoną do plazmy termicznej. Występuje w niej całkowita równowaga termodynamiczna wszystkich jej składników oraz równomierna koncentracja różnych rodzajów cząstek. Kolejnym ważnym kryterium klasyfikacji plazmy jest równowaga termodynamiczna cząstek, która oznacza równą w przybliżeniu energię elektronów, jonów i cząstek neutralnych. Mówiąc o równowadze termodynamicznej plazmy mamy zwykle na myśli tzw. równowagę lokalną. Wyładowania, będące źródłem plazmy w lokalnej równowadze termodynamicznej, charakteryzują się stosunkowo wysokimi temperaturami i wykorzystywane są tam, gdzie wymagane jest ciepło, a więc przy cięciu, napyłaniu czy topieniu, a w zastosowaniach analitycznych do odparowania materiału poddawanego analizie chemicznej. Plazmę nierównowagową, natomiast wykorzystujemy tam, gdzie ciepło może niekorzystnie wpływać na proces technologiczny, a zatem w procesach wytrawiania, nanoszenia (depozycji) cienkich warstw materiałów, procesach plazmo-chemicznych, biotechnologiach, itp. Należy podkreślić, że jakkolwiek wysokie ciśnienie oznacza na ogół plazmę termiczną i równowagową a niskie nietermiczną i nierównowagową, to ostatecznym kryterium przesądającym o klasyfikacji plazmy na termiczną i nietermiczną jest

iloczyn ciśnienia,  $p$ , i odstepu między elektrodami,  $d$ . Do takich nietermicznych i nierównowagowych wyładowań należą, zachodzące przy ciśnieniu atmosferycznym, wyładowania katodowe w mikro-otworach (mikro-geometriach – z ang. microhollow cathode discharges) oraz w kapilarach, które obecnie są przedmiotem zaawansowanych badań w wielu ośrodkach naukowych na świecie [26]. Ideę tych wyładowań omówiono w rozdziale 2.10.

## **2.2. Plazma nietermiczna – warunki generacji i zastosowania**

Plazma niskotemperaturowa, zwana również nietermiczną lub "zimną", jest stosowana w technologiach ochrony środowiska i biotechnologiach. Plazma taka jest również nierównowagowa co oznacza, że energie elektronów są znacznie większe od energii pozostałych jej cząstek. Zainteresowanie wytwarzaniem i zastosowaniami nietermicznej i nierównowagowej plazmy wciąż rośnie, a główną tego przyczyną jest możliwość swobodnego kontrolowania jej parametrów w szerokich granicach, w zależności od zastosowań, poprzez:

- skład chemiczny gazu roboczego, który decyduje o rodzaju i energiach aktywnych cząstek plazmy (elektronów, atomów, molekuł, jonów, rodników),
- ciśnienie – w zakresie od niemal próżni do ciśnienia atmosferycznego; wyższe prowadzi do zmniejszenia drogi swobodnej cząstek plazmy i równowagi termodynamicznej,
- strukturę pola elektromagnetycznego; zewnątrznie wzbudzone pole elektryczne i/lub magnetyczne wykorzystuje się do przyspieszania, grzania, kompresji i kierowania cząstek plazmy,
- geometrię wyładowania – brak lub obecność elektrod, obecność dielektryka, objętość przestrzeni wyładowczej – wyładowania w małej objętości oznaczają odejście od równowagi termodynamicznej,

- parametry układu zasilającego (moc, napięcie, częstotliwość, liczba faz, kształt napięcia zasilającego, impedancja wewnętrzna układu zasilania).

W plazmie nietermicznej większość energii elektrycznej wykorzystywana jest na wytwarzanie wysokoenergetycznych elektronów, nie zaś na podgrzewanie gazu. A zatem, energia plazmy jest kierowana na dysocjacje wywołaną zderzeniami z elektronami i jonizację gazu w celu wyprodukowania rodników, które rozkładają toksyczne cząsteczki gazu. W języku potocznym mówimy, że w plazmie nietermicznej elektrony są „gorące”, zaś pozostałe cząstki plazmy są „zimne” – mogą mieć temperaturę otoczenia i niższą. W wielu zastosowaniach, zwłaszcza przy usuwaniu bardzo rozcieńczonych substancji zanieczyszczających powietrze, technika zastosowania plazmy niskotemperaturowej jest najbardziej odpowiednia i niezastąpiona, ze względu na selektywność energii i możliwość usuwania kilku zanieczyszczeń powietrza jednocześnie. W innych zastosowaniach, gdy występują mieszane rodzaje odpadów, wykorzystuje się plazmę termiczną do spalania całkowitego odpadów, łącznie z pojemnikiem, a następnie plazmę niskotemperaturową do oczyszczenia gazów powstałych w procesie spalania. Dotychczas przebadano wiele typów reaktorów plazmy niskotemperaturowej wykorzystywanych w procesach związanych z ochroną środowiska. Potencjalne możliwości tych urządzeń potwierdzono niejednokrotnie przy usuwaniu tlenków azotu  $\text{NO}_x$ , dwutlenku siarki  $\text{SO}_2$  z gazów spalinowych, metali ciężkich i lotnych substancji organicznych powstających w procesach malowania, lakierowania i procesach chemicznych [27].

Jako zjonizowany gaz, cząsteczki plazmy łatwo wchodzi w reakcje z różnymi substancjami chemicznymi, co pozwala na rozkład związków toksycznych, modyfikacje struktur polimerowych, niszczenie bakterii i grzybów oraz wpływanie na ich struktury biologiczne i DNA.

Wśród zastosowań środowiskowych, najbardziej technologicznie zaawansowaną i stosowaną w praktyce jest technologia obróbki wody pit-

nej. Niemal od początku XX wieku powstawały w Europie (Nicea 1907) i na Świecie (Los Angeles 1987) stacje obróbki wody, w których szkodliwy dla środowiska chlor był zastępowany ozonem wytwarzanym w wyładowaniach barierowych. Obecnie na świecie pracuje ponad 3000 instalacji ozonowania wody pitnej, w których ozonatory wytwarzają ponad 100 kg O<sub>3</sub>/h a moce jednostkowe stacji ozonowania sięgają setek megawatów [28, 29]. W połowie dwudziestego wieku zaczęto powszechnie stosować ozonowanie wody basenowej.

Inne środowiskowe zastosowania ozonu generowanego w wyładowaniach barierowych w powietrzu bądź tlenie obejmują:

- sterylizację powietrza, wody, gleby, powierzchni i opakowań – badane są różne typy wyładowań w powietrzu, nad powierzchnią wody i bezpośrednio w wodzie, szczególnie przy zasilaniu impulsowym; prowadzone są próby usuwania mikrobiologicznych zanieczyszczeń papieru, opakowań z tworzyw sztucznych, redukcji tlenków azotu z gazów spalinowych pochodzących ze spalania gazu naturalnego, usuwania tlenków azotu (NO<sub>x</sub>), dwutlenku siarki (SO<sub>2</sub>), metali ciężkich i lotnych substancji organicznych (VOC) powstających w procesach malowania, lakierowania, spalania odpadów poszpitalnych i w innych procesach chemicznych [30÷44],
- recykling i usuwanie zanieczyszczeń – rozkład i spalanie odpadów organicznych, lotnych i stałych, gazów spalinowych z silników wysokoprężnych, zużytych baterii, płytek obwodów drukowanych, za pomocą plazmy łukowej i kwasi-łukowej [32, 38, 44, 45],
- wspomaganie reakcji chemicznych – selektywne usuwanie acetylenu z etylenu, rozkład etylenu, trichloroetylenu, octanu etylu i toluenu, wytwarzanie wodoru gazowego i sadzy poprzez rozpad węglowodorów [46, 47, 48].

Większość wymienionych badań jest znacznie zaawansowana, a niektóre z nich zostały już zastosowane w praktyce.

Biologiczne i medyczne zastosowania plazmy niskotemperaturowej wykorzystują bakteriobójcze właściwości wyładowań elektrycznych, a zwłaszcza wytwarzanych podczas tych wyładowań takich związków, jak ozon (O<sub>3</sub>), tlenek azotu (NO) i nadtlenek wodoru (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

Pożądaną cechą plazmy w tych zastosowaniach jest brak równowagi termodynamicznej – niska temperatura gazu i wysokie energie elektronów inicjują reakcje chemiczne, wpływające na struktury biologiczne i DNA bakterii, wirusów i grzybów, ale nie niszczą innych (zdrowych i korzystnych dla funkcjonowania) składników czy komórek środowiska biologicznego poddawanego obróbce plazmowej.

Badane są różne rodzaje wyładowań elektrycznych przy ciśnieniu atmosferycznym, ale szczególna uwaga poświęcona jest wyładowaniom impulsowym – energia dostarczana elektronom w bardzo krótkim czasie (rzędu nanosekund) trwania impulsu, nie podgrzewa otaczającego medium (gazu, cieczy, komórek) [47, 48, 49].

Aktualnie, zastosowania biologiczne i medyczne obejmują:

- sterylizację żywych tkanek ludzkich i zwierzęcych i wspomaganie leczenia – zabijanie mikroorganizmów, zwłaszcza trudno usuwalnych przetrwalników bakteryjnych, bioodkażanie za pomocą wyładowań w postaci ślizgającego łuku, wyładowań stałoprądowych w powietrzu, mechanizmy oddziaływania plazmy nietermicznej na bakterie, sterylizację niskotemperaturową w plazmie impulsowej; koagulację i sterylizację ran powierzchniowych, krwi, zastosowania w stomatologii, wspomaganie leczenia nowotworów skóry [42, 49÷55];
- sterylizację narzędzi medycznych – zwłaszcza elementów wykonanych z tworzyw sztucznych nieodpornych na wysoką temperaturę; wykorzystywana jest plazma impulsowa, mikrofalowa, w środowisku suchym i wilgotnym [37÷40, 56];
- pokrywanie implantów i soczewek warstwami biokompatybilnymi – wytwarzanie i biologiczne zastosowania polimerów plazmowych w leczeniu i diagnostyce, poprawa właściwości i biokompatybilności cien-

kich warstw amorficznych na protezach dentystycznych, powierzchni tytanu, nanowarstw na soczewkach kontaktowych, osadzanie plazmowe kompozytowych, bioaktywnych powłok implantów wewnątrzkościowych [57, 58];

- inżynierię tkankową – plazma wspomaga wytwarzanie czynników bioaktywnych i leków, immobilizuje molekuły biologiczne, modyfikuje powierzchnie w celu regulowania zachowań komórki, poprawia adhezję krwi [57, 59÷61];
- diagnostykę medyczną – wytwarzanie biosensorów na bazie polimerów i cienkich warstw amorficznych do analiz medycznych [62].

Metody plazmowe w biomedycynie, a zwłaszcza szeroko już stosowana w praktyce medycznej ozonoterapia, wykazują wysoką skuteczność, eliminują większość bakterii, wirusów, grzybów i pleśni, aktywizują działanie enzymów antyutleniających, pobudzają wytwarzanie białych krwinek. W oddziaływaniu z żywymi organizmami i tkankami, w bezpiecznych dawkach, nie dają skutków ubocznych, są bezbolesne, nie wywołują reakcji alergicznych, a często eliminują konieczność kuracji farmakologicznej [53, 54, 63].

Prace badawcze dotyczące zastosowań nietermicznej plazmy w technologiach związanych z ochroną środowiska oraz w biotechnologiach mają na celu, m.in.:

- ocenę przydatności i skuteczności różnych rodzajów wyładowań elektrycznych do wytwarzania plazmy nietermicznej, zwłaszcza przy ciśnieniu atmosferycznym,
- usprawnienie procesu generacji elektronów inicjujących proces usuwania zanieczyszczeń,
- osiągnięcie pożądanego składu końcowego mieszaniny gazowej i wysokiego stopnia konwersji szkodliwych związków poprzez dodawanie domieszek i katalizatorów (para wodna, amoniak),
- minimalizację zużycia energii,
- dopasowanie źródła zasilania elektrycznego do reaktora plazmowego.



Układ zasilania, niezależnie od rodzaju wyładowań elektrycznych wykorzystywanych do generacji plazmy, przesądza o sprawności całego procesu plazmowego i, w konsekwencji, o możliwości jego przemysłowego zastosowania. Dlatego, w pracy, po przeglądzie wyładowań elektrycznych służących do generacji nietermicznej plazmy opisano podstawowe systemy zasilania reaktorów plazmowych w energię elektryczną (rozdział 4).

### **2.3. Wyładowania elektryczne jako źródło plazmy**

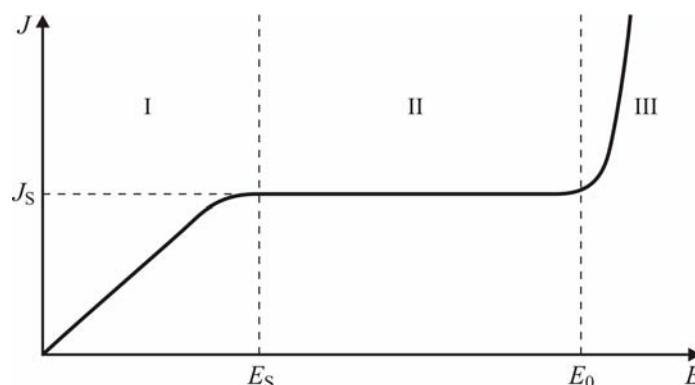
Plazmę dla celów technologicznych wytwarza się za pomocą wyładowań elektrycznych, które mogą występować w różnych formach, w zależności od geometrii elektrod i elektrycznego układu zasilania.

W technologiach plazmowych wykorzystuje się zarówno wyładowania niezupełne, nie zwierające elektrod reaktora plazmowego jak i wyładowania zupełne, do których zaliczamy wyładowanie łukowe.

Dotychczas przebadano niemal wszystkie rodzaje wyładowań elektrycznych jako potencjalne źródło plazmy, począwszy od wyładowań w uwarstwionych układach dielektrycznych, poprzez wyładowania koronowe w silnie niejednorodnych polach elektrycznych, wyładowania jarzeniowe przy ciśnieniu atmosferycznym, wyładowania mikrofalowe a na wyładowaniach kwasi-łukowych i łukowych skończywszy.

Mechanizmy wyładowania w gazach można prześledzić na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej przestrzeni gazowej zawartej między płaskimi elektrodami umieszczonymi w odległości  $d$ , do których przyłożono stałe napięcie  $U$ , wytwarzając w szczelinie jednorodne pole elektryczne  $E$  (rys. 2.1). Wzrost wartości przyłożonego napięcia powoduje zmiany średniej wartości gęstości prądu w układzie, według krzywej przedstawionej na rysunku 2.1, w której wyróżniamy 3 zakresy: I – omoowy, gdy prąd wzrasta proporcjonalnie do wartości napięcia, II – nasycenia oraz III – skokowego wzrostu gęstości prądu, spowodowanego procesami

jonizacji zderzeniowej i formowaniem lawin elektronowych. Dla powietrza, przy ciśnieniu 1 bara, wymagana wartość pola elektrycznego  $E_0$ , powodująca nagły wzrost gęstości prądu w III zakresie, wynosi 25 kV/cm.



Rys. 2.1. Gęstość prądu wyładowania  $J$  w funkcji natężenia pola elektrycznego  $E$  w płaskim układzie elektrod metalowych oddalonych od siebie o  $d$ ; I – zakres omowy, II – zakres nasycenia, III – zakres skokowego wzrostu prądu

Analizując mechanizmy rozwoju wyładowania elektrycznego w gazie musimy pamiętać, że pole elektryczne w przestrzeni gazowej oddziałuje tylko na cząsteczki uprzednio naładowane – jony. Zatem naładowane cząsteczki gazu muszą znajdować się w przestrzeni wyładowczej zanim dołączymy do elektrod napięcie. W przestrzeni gazowej zawsze występuje pewna liczba swobodnych elektronów emitowanych przez elektrody na skutek wszechobecnego promieniowania kosmicznego, za mała jednak, aby przy braku zewnętrznego potencjału, podtrzymać wyładowanie elektryczne. Przyłożenie zewnętrznego potencjału sprawia, że elektrony w pobliżu katody przyśpieszane są polem elektrycznym i w wyniku zderzeń z atomami gazu powodują jego wzbudzenie i jonizację. Wytworzone jony uderzając w katodę wyzwala ją z niej elektrony wtórne, które dają początek nowym procesom jonizacji i tworzeniu się lawin elektronowych.

Procesy wzbudzenia i jonizacji w gazach mogą odbywać się w objętości gazu oraz na powierzchniach elektrod – jonizacja objętościowa

i powierzchniowa. Do procesów jonizacji objętościowej zaliczamy: termojonizację, fotojonizację i jonizację zderzeniową, zaś procesy, które zachodzą na powierzchni elektrod to termoemisja, fotoemisja, emisja polowa i wtórna emisja elektronowa. Procesy jonizacji zderzeniowej w objętości gazu, zwane procesami  $\alpha$ , i wtórnej emisji elektronowej z powierzchni elektrod, procesy  $\beta$ , mają największy udział w generacji naładowanych cząstek (elektronów i jonów), które uczestniczą w wyładowaniu elektrycznym. Ponadto, na liczbę zjonizowanych cząstek gazu w przestrzeni wyładowczej mają wpływ procesy rekombinacji oraz dołączania i odłączania elektronów. Gwałtowny wzrost gęstości prądu w III zakresie charakterystyki przedstawionej na rysunku 2.1 spowodowany jest procesami jonizacji zderzeniowej i formowaniem lawin elektronowych.

Rozróżnia się dwa podstawowe mechanizmy formowania się lawin elektronowych: strimerowy i Townsenda. Badania wskazują, że mechanizm strimerowy objaśnia dobrze rozwój wyładowań w gazach przy jednorodnym, lub prawie jednorodnym rozkładzie natężenia pola elektrycznego. Strimery (cylicydryczne strugi prądowe) powstają, gdy elektrony początkowe wzbudzone polem elektrycznym osiągają krytyczną lokalną gęstość, przy której wartość natężenia pola elektrycznego, od ładunku przestrzennego  $E_p$  w pobliżu czoła pojedynczej lawiny elektronowej, osiąga wartość zewnętrznego pola elektrycznego  $E_z$  ( $E_p = E_z$ ). Tak znaczne wartości pola elektrycznego od ładunku przestrzennego mogą powstawać dzięki znacznie większej ruchliwości elektronów niż jonów dodatnich. Rozprzestrzenianie się strimerów jest podtrzymywane lawinami wtórnymi, złożonymi z elektronów powstałych w procesie fotojonizacji gazu międzyelektrodowego. Wzrost strimerów powoduje w efekcie wypełnienie przestrzeni międzyelektrodowej plazmą nietermiczną. Klasyczne wyładowanie Townsenda lub Paschena, jest także formą lawiny elektronowej, ale w przeciwieństwie do wyładowania strimerowego, jest podtrzymywane emisją wtórną elektronów z katody. Zatem, według mechanizmu

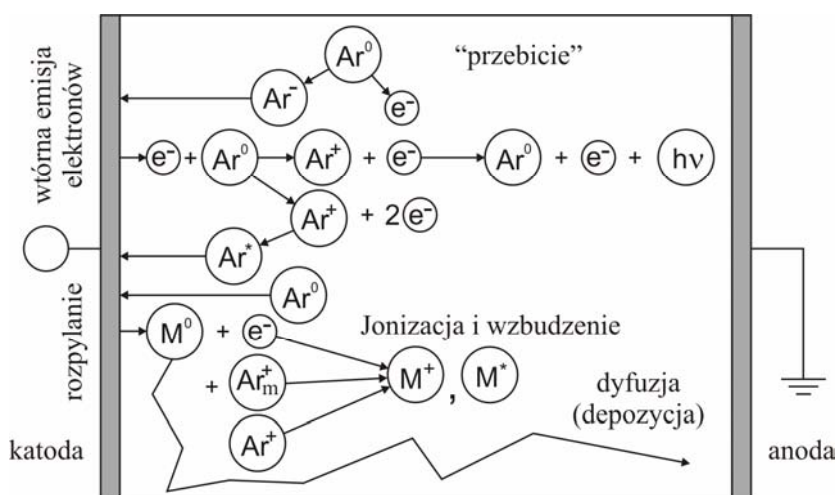
strimerowego, wyładowanie elektryczne w gazie składa się z pojedynczych szybkich mikrowyładowań, podczas gdy zgodnie z mechanizmem Townsenda, wyładowanie składa się z wielkiej liczby następujących po sobie lawin elektronowych [26, 65÷67]. Mechanizm Townsenda ma zastosowanie wówczas, gdy mamy do czynienia z niższymi wartościami iloczynu ciśnienia gazu  $p$  i szerokości szczeliny  $d$ , wolniejszymi zmianami napięcia zasilającego i stosunkowo dużymi współczynnikami emisji wtórnej  $\gamma$ . Wyładowanie odbywa się według mechanizmu strimerowego dla większych wartości iloczynu  $pd$ , niskich współczynników emisji wtórnej,  $\gamma$ , i wyższych napięć [67].

Oba mechanizmy powstawania mikrowyładowań obserwowane są w reaktorach z barierą dielektryczną (ozonatorach). Dla niższych napięć, gdy uśredniony prąd wyładowania jest dużo mniejszy od prądu przesunięcia, wyładowania można opisać podobnie jak w układzie między elektrodami metalowymi bez bariery dielektrycznej za pomocą mechanizmu Townsenda. Intensywne wyładowania, których uśredniony prąd jest porównywalny z prądem przesunięcia, opisuje się mechanizmem strimerowym. Plazma, wytwarzana podczas elektrycznych wyładowań barierowych (zwanymi także wyładowaniami cichymi lub niezupełnymi), jest nietermiczna i nierównowagowa. Elektrony, jony i obojętne cząstki gazu nie są w równowadze termodynamicznej a energia elektryczna, ze względu na krótki czas trwania mikrowyładowań i małą ruchliwość jonów, dostarczana jest elektronom. Zatem elektrony są „gorące”, podczas gdy pozostałe cząstki gazu są „zimne”. Decyduje to o wysokiej sprawności procesu przekazywania energii na przemiany chemiczne w plazmie nietermicznej [27].

W następnych rozdziałach omówione zostaną rodzaje wyładowań elektrycznych wykorzystywanych do generacji nietermicznej i nierównowagowej plazmy przy ciśnieniu atmosferycznym oraz ich mechanizmy i parametry.

## 2.4. Wyładowania przy napięciu stałym DC

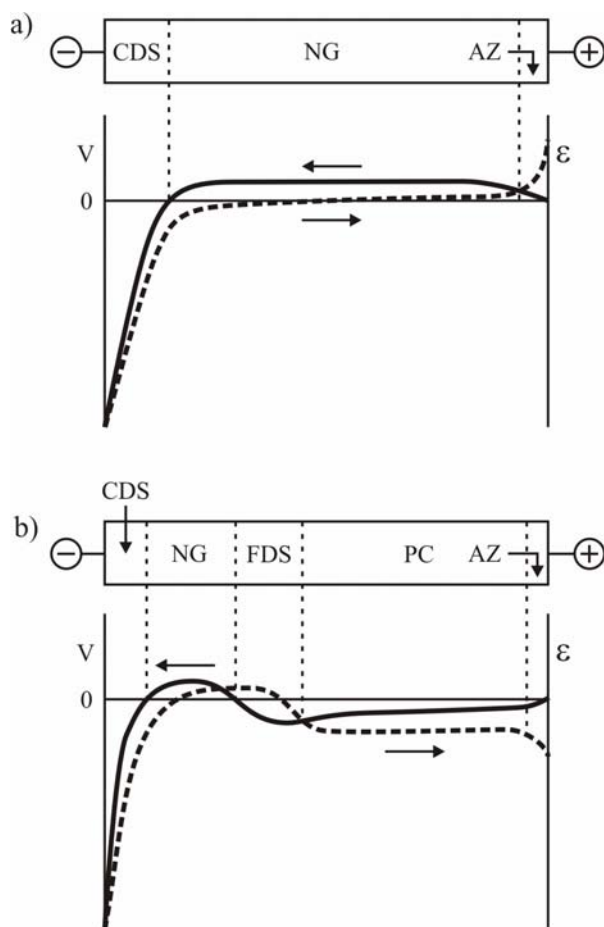
Mechanizmy przebicia przestrzeni gazowej przy stałym napięciu zasilającym są dobrze znane i opisane w bogatej literaturze dotyczącej wyładowań elektrycznych [25, 26, 64, 65, 68], dlatego ograniczono się do przypomnienia podstawowych zjawisk towarzyszących jonizacji gazu, zachodzących w jego objętości i na powierzchni elektrod, które wykorzystywane są w procesach plazmowych. Zderzeniom jonów i elektronów w przestrzeni międzyelektrodowej i na elektrodach towarzyszą procesy wybijania materiału katody (rozpylania, z ang. sputtering), jego dyfuzji i osadzania (depozycji) na anodzie (Rys. 2.2).



Rys. 2.2. Zjawiska towarzyszące procesom jonizacji w przestrzeni gazowej między elektrodami metalowymi z argonem jako gazem plazmotwórczym, opracowano na podstawie [68]

Zjawisko rozpylania katodowego wykorzystywane jest w spektrochemii analitycznej (spektrometry masowe) oraz w technologiach materiałowych do osadzania cienkich warstw z materiału katody na anodzie pełniącej rolę podłoża (substratu). Podstawowe zjawiska obserwowane w wyładowaniu jarzeniowym (świetlącym) przy napięciu stałym to: zderzenia sprężyste i niesprężyste między cząsteczkami gazu prowadzące do

ich wzbudzenia i jonizacji, formowanie lawin elektronowych, przyspieszanie jonów polem elektrycznym w kierunku katody, powodujące wybijanie z katody elektronów wtórnych oraz materiału katody, dyfuzja materiału katodowego w stronę anody i jego osadzanie.



Rys. 2.3. Przestrzenny rozkład potencjału w wyładowaniu jarzeniowym przy napięciu stałym, a) dla małego odstępów katoda-anoda i/lub przy niskim ciśnieniu; b) dla większych odstępów międzyelektrodowych i/lub większych ciśnień; opracowano na podstawie [68]

Potencjał między elektrodami wyładowania typu DC jest nierównomiernie rozłożony a jego prawie całkowity spadek obserwowany jest w bliskim sąsiedztwie katody (rys. 2.3 a). Region w pobliżu katody

(CDS), charakteryzujący się silnym polem elektrycznym, zwany jest ciemnią lub powłoką katodową (z ang. sheath). Największą część przestrzeni wyładowania jarzeniowego typu DC zajmuje tzw. jarzenie ujemne (NG), napięcie którego, zwane potencjałem plazmy, jest stałe i nieznacznie dodatnie. Po nim następuje krótki obszar anodowy (AZ), w którym dodatnie napięcie plazmy osiąga na anodzie wartość równą zeru. Przy większych odległościach międzyelektrodowych obserwowane są dwa dodatkowe regiony w przestrzeni międzyelektrodowej (rys. 2.3 b): ciemnia Faradaya (FDS) oraz kolumna dodatnia (PC).

Charakteryzują się one nieznacznie ujemnym polem elektrycznym przyciągającym elektrony w kierunku anody. Oba te regiony występują w wyładowaniu jarzeniowym wykorzystywanym w laserach oraz lampach fluorescencyjnych. Jednakże w większości zastosowań plazmy wyładowania jarzeniowego, odległość międzyelektrodowa jest niewielka a rozkład potencjału jest taki, jak to przedstawiono na rysunku 2.3 a. Wyładowanie jarzeniowe przy stałym wymuszeniu DC może zachodzić w szerokim zakresie ciśnień gazu, od 1 Pa do ciśnienia atmosferycznego lub wyższego; napięcie pracy wynosi zwykle kilkaset woltów, ale w niektórych zastosowaniach może sięgać kilku kilowoltów, a prąd wyładowania jest rzędu miliamperów. Wyładowania typu DC mogą zachodzić w gazach rzadkich (argon, hel) oraz w gazach reaktywnych ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $SiH_4$ ,  $SiF_4$ ) i ich mieszaninach. Szczególnym rodzajem wyładowań między elektrodami metalowymi są wyładowania koronowe, które zachodzą w układach o znacznej niejednorodności pola elektrycznego, wynikającej z geometrii elektrod reaktora.

## **2.5. Wyładowania koronowe**

Wyładowania elektryczne wytwarzane w układach o znacznej asymetrii pola elektrycznego mają duże znaczenie aplikacyjne. Należą do nich wyładowania koronowe w układach ostrze – płyta, przewód płyta, zarów-

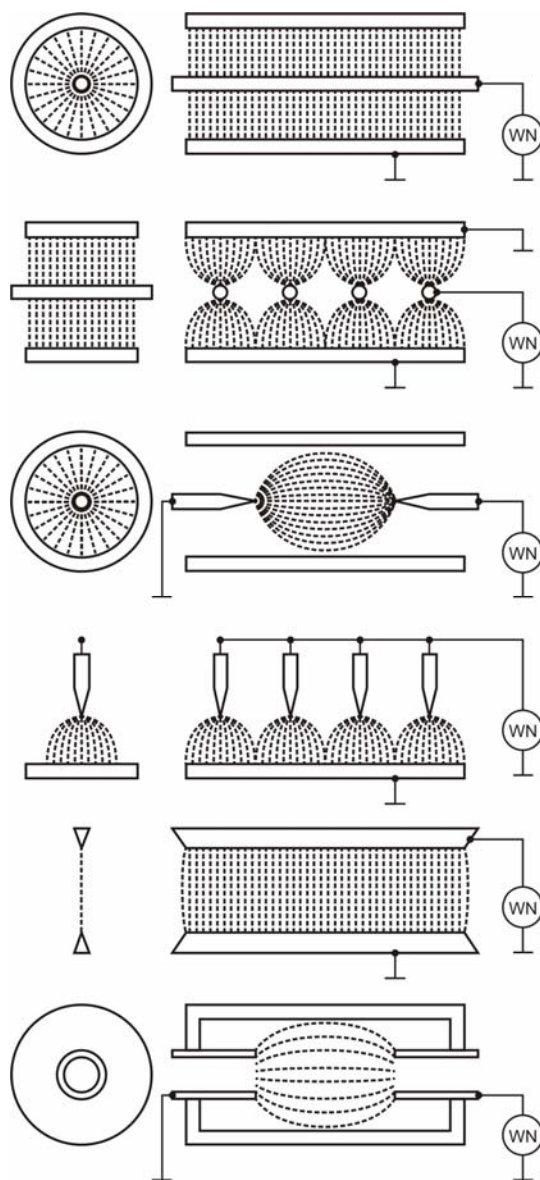
no w symetrii płaskiej jak i cylindrycznej. Zalicza się tu także wyładowania w obecności dielektryków o wysokiej stałej dielektrycznej (ferroelektryków) oraz wyładowania zachodzące po powierzchni dielektryków stałych, zwane wyładowaniami powierzchniowymi. W zależności od polaryzacji elektrod rozróżnia się wyładowania koronowe dodatnie i ujemne. W konfiguracji ostrze - płyta i dodatniej polaryzacji ostrza, wyładowanie rozpoczyna się pojedynczym impulsem, który w miarę wzrostu napięcia przekształca się w wyładowanie wstępowe, jarzeniowe i w końcu iskrowe. Przy przeciwnej polaryzacji ostrza obserwuje się koronę ujemną w postaci impulsów Trichela [26, 27], które następnie, wraz ze wzrostem wartości doprowadzanego napięcia, przekształcają się w drgania korony i wyładowanie iskrowe.

Prąd wyładowania koronowego jest ograniczony emitowanym przez plazmę ładunkiem o jednej polaryzacji gromadzącym się w przestrzeni międzyelektrodowej. Powoduje to, że wyładowanie koronowe ma dodatkową charakterystykę prądowo-napięciową (rezystancyjną) – wzrost, natężenia prądu wymaga zwiększenia napięcia. Jeśli prąd wyładowania jest wystarczająco duży, to powstają dodatkowe nośniki prądu, czego wynikiem jest wyładowanie iskrowe. Jest ono zazwyczaj opisywane ujemną charakterystykę rezystancyjną, ale przejście od wyładowania koronowego do wyładowania iskrowego nie jest jednoznacznie określone. Najczęściej spotykane geometrie komór wyładowczych reaktorów plazmowych z wyładowaniami koronowymi (zwanymi także koronatorami) przedstawia rysunek 2.4 [69,70].

Aby podtrzymać wyładowanie jarzeniowe przy stałym napięciu, obie elektrody muszą być przewodzące. Jeśli jedna lub obie elektrody są pokryte materiałem nieprzewodzącym (o dużej rezystywności), lub stają się nieprzewodzące podczas wyładowania wówczas, na skutek akumulacji ładunków na elektrodach, następuje zgaszenie wyładowania przy stałym napięciu zasilającym. Dzieje się tak, gdy wyładowanie jarzeniowe wykorzystywane jest w spektrochemii analitycznej materiałów nieprzewodzą-



cych, a także przy nakładaniu warstw dielektrycznych, bądź w elektrofiltrach, podczas osadzania na elektrodzie zbiorczej drobnych cząstek wysokorezystywnego pyłu.



Rys. 2.4. Konfiguracje elektrod do generacji wyładowania koronowego, kolejno od góry drut-cylinder, drut-płyta, igła-igła, igła-płyta, ostrze-ostrze, wnęka-wnęka, WN – źródło wysokiego napięcia; opracowano na podstawie [70]

Można temu zapobiec stosując impulsowe napięcie zasilające reaktor plazmowy. Ten typ wyładowań zostanie omówiony w rozdziale 2.7.

Wyładowanie koronowe prądu stałego, gdy elektroda niskonapięciowa pokryta jest warstwą dielektryka o dużej rezystywności nosi nazwę wyładowania wstecznego (z ang. back corona discharge). Taki typ wyładowania jest obserwowany w elektrofiltrach, gdy wysokorezystywny pył osiada na elektrodzie zbiorczej [69, 70]. Prąd jonowy nie może wówczas przepływać swobodnie w obszarze międzyelektrodowym, ponieważ na powierzchni warstwy dielektrycznej gromadzi się ładunek elektryczny. Powoduje on wzrost natężenia pola elektrycznego w obszarze dielektryka i zmniejszenie pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej. W skrajnym warunkach może nastąpić przebicie warstwy dielektryka i powstanie w niej kraterów, z których następuje emisja jonów o znaku przeciwnym do polaryzacji elektrody wysokonapięciowej.

W elektrofiltrach zjawisko wyładowania wstecznego powoduje zmniejszenie ich skuteczności, natomiast reaktory z barierą dielektryczną z mikrootworami, w których, w pewnych warunkach, zaczynają zachodzić wyładowania typu „microhollow cathode”, będące w istocie formą wyładowań wstecznych, wydają się być obiecującym źródłem plazmy nietermicznej przy ciśnieniu atmosferycznym (rozdział 2.10).

Główne zastosowania plazmy wyładowań koronowych (CDs, z ang. corona discharges) obejmują:

- oczyszczanie gazów wylotowych;
- usuwanie lotnych substancji organicznych emitowanych w procesach malowania i lakierowania oraz przez przemysł chemiczny i petrochemiczny;
- obróbkę wody pitnej.

Wyładowanie jarzeniowe, przy napięciu przemiennym AC, można uzyskać, umieszczając w przestrzeni międzyelektrodowej dielektryk. Warstwa dielektryka na jednej lub obu elektrodach pozwala uzyskać stabilne wyładowania elektryczne. Do takich wyładowań należą, omówione

w dalszej części pracy, wyładowania częstotliwości radiowej, przy wymuszeniu impulsowym, wyładowania barierowe DBDs, (z ang. dielectric barrier discharges) i wyładowania jarzeniowe przy ciśnieniu atmosferycznym APGD (z ang. atmospheric pressure glow discharges).

## 2.6. Wyładowania częstotliwości radiowej

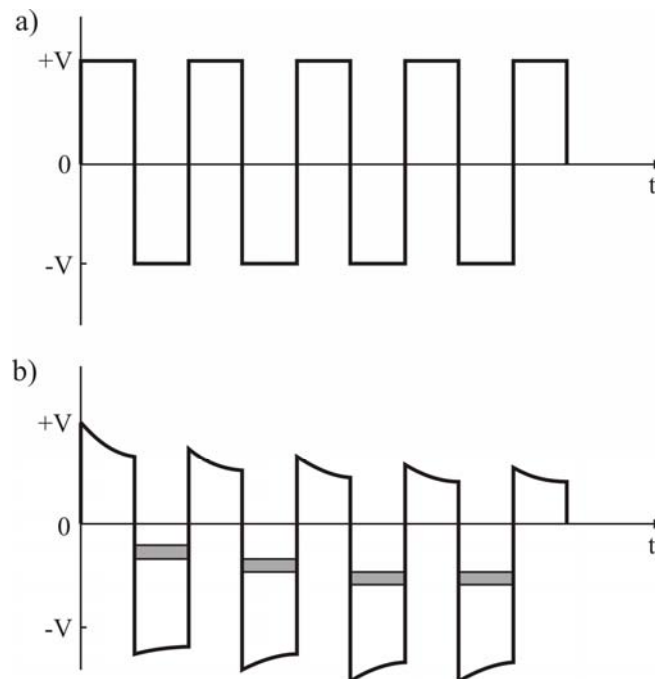
Zasilając układ płaskich elektrod napięciem przemiennym (AC) powodujemy, że każda z nich, w kolejnych półokresach napięcia zasilającego, jest na przemian katodą i anodą, a ładunek zgromadzony podczas jednego półokresu napięcia jest częściowo neutralizowany ładunkiem przeciwnego znaku, gromadzącym się w następnym półokresie przy napięciu o przeciwnej polaryzacji. Reaktory z wyładowaniami RF (z ang. radio frequency) pracują przy częstotliwościach napięcia sinusoidalnego z zakresu od 1 kHz do 1 GHz, a najczęściej stosowaną częstotliwością pracy takich reaktorów jest 13,56 MHz [68]. Ze względu na różne masy jonów i elektronów ich zachowanie w polu wyładowań częstotliwości radiowej jest odmienne. Lekkie elektrony podążają za szybkimi zmianami pola, ponieważ ich częstotliwość charakterystyczna, zwana częstotliwością elektronową plazmy  $f_{pe}$ , jest funkcją gęstości elektronów w plazmie i wyraża się zależnością:

$$f_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}}, \quad f_{pe} = 9000 \sqrt{n_e}, \quad (2.1)$$

w której:  $n_e$  i  $m_e$  – odpowiednio, gęstość i masa elektronów,  $e$  – ładunek elektronu,  $\epsilon_0$  – stała dielektryczna próżni.

Dla typowych wartości gęstości elektronów  $n_e = 10^{10} \div 10^{13} \text{ m}^{-3}$ , częstotliwość elektronowa plazmy wynosi od  $9 \cdot 10^8$  do  $3 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$  i jest znacznie większa od częstotliwości zmian pola. Ciężkie jony mogą nadążać jedynie za uśrednionymi w czasie zmianami pola. Ta dysproporcja mas elek-

tronów i jonów jest powodem powstawania w takich wyładowaniach własnego stałego napięcia polaryzacji (z ang. self-bias lub DC-bias).



Rys. 2.5. Ilustracja powstawania zjawiska polaryzacji (b), na skutek dysproporcji mas elektronów i jonów w plazmie częstotliwości radiowej, przy napięciu zasilającym w postaci fali prostokątnej (a), opracowano na podstawie [68]

Na rysunku 2.5 objaśniono mechanizm powstawania ujemnego napięcia polaryzacji w wyładowaniu RF zasilanym napięciem w postaci fali prostokątnej. Początkowo dodatnie napięcie przyspiesza lekkie elektrony i przestrzeń międzyelektrodowa (kondensator) ładowana jest prądem elektronowym, a napięcie plazmy maleje. Po zmianie polaryzacji napięcia zasilającego ładowanie kondensatora odbywa się prądem jonowym, a powodowany tym procesem spadek napięcia plazmy jest znacznie mniejszy, z uwagi na znacznie większą masę jonów niż elektronów. W kolejnych półokresach napięcia przemiennego następuje doładowywanie przestrzeni międzyelektrodowej, aż do chwili gdy przestrzeń jest naładowana ujemnym ładunkiem a, uśrednione za okres napięcia zasilające-

go, strumienie elektronów i jonów w plazmie zrównoważą się. W efekcie pojawia się między elektrodami ujemne napięcie polaryzacji o wartości kilkuset woltów, w zależności od napięcia zasilającego i odstępów elektrod, które przyspiesza jony dodatnie w kierunku katody i może powodować wybijanie z niej materiału (z ang. sputtering). Zjawisko pojawienia się ujemnego napięcia polaryzacji występuje także, gdy: elektrody, między którymi zachodzi wyładowanie, różnią się wymiarami, jeśli między układem zasilania częstotliwości radiowej a elektrodami włączony jest kondensator, bądź jeśli elektrody są nieprzewodzące i układ działa jak kondensator.

Wyładowania w układach dielektrycznych przy napięciu zasilającym o częstotliwości radiowej nazywa się często wyładowaniami pojemnościowo-sprzężonymi (z ang. capacitively coupled – cc) bądź, z powodu ujemnego napięcia polaryzacji, diodami częstotliwości radiowej (z ang. RF diodes). Należy zwrócić uwagę, że częstotliwość napięcia zasilającego powinna być odpowiednio wysoka, aby w czasie półokresu napięcia zasilającego kondensator nie zdążył się w pełni naładować, bowiem tylko w ten sposób można uzyskać kwasi-ustalone wyładowanie, zamiast serii krótkich impulsów wyładowczych [68].

Reaktory z wyładowaniami RF, wykorzystywane w procesach obróbki plazmowej do nakładania cienkich warstw, składają się zwykle z elektrod płaskich oddalonych od siebie o kilka centymetrów i umieszczonych w próżni. Na jednej z elektrod umieszcza się podłoże (substrat).

Typowe wartości napięć zasilających wynoszą od 100 V do 1000 V, gęstości elektronów są rzędu  $(10^9 \div 10^{11}) \text{ cm}^{-3}$  zaś ciśnienie pracy od 1 Pa do 100 Pa. W zastosowaniach analitycznych zarówno ciśnienie jak i gęstości elektronów są nieco wyższe i wynoszą odpowiednio; kilkaset paskali oraz  $(10^{12} \div 10^{13}) \text{ cm}^{-3}$ .

## 2.7. Wyładowania impulsowe

Jeśli napięcie do przestrzeni wyładowań będzie dostarczane w postaci krótkotrwałych impulsów o czasie trwania rzędu kilku mikro- do milisekund, wyładowanie między elektrodami będzie nietermiczne, ale może zachodzić przy znacznie wyższych impulsach napięcia i prądu niż wyładowanie jarzeniowe przy wymuszeniu stałym DC. Dzięki temu zjawiska wzbudzenia i jonizacji, które nieliniowo zależą od natężenia pola elektrycznego, są, przy wymuszeniu impulsowym, znacznie bardziej intensywne. Zjawiska w wyładowaniu impulsowym są podobne do tych, jakie występują w wyładowaniu przy wymuszeniu stałym (rozdział 2.4). Należy je zatem traktować jako krótkotrwałe wyładowanie DC, po którym następuje dłuższy czas bez wyładowania (zwany z ang. afterglow – poświata), aż do pojawienia się następnego impulsu napięcia. W krótkim czasie trwania impulsu napięcia, energie elektronów osiągają znacznie większe wartości (rzędu kilku eV) niż energie pozostałych cząstek plazmy (poniżej 0,1 eV). Dzięki temu, generowana plazma jest chemicznie aktywna przy niższych mocach dostarczanych ze źródła zasilania, niż ma to miejsce przy zasilaniu napięciem stałym.

W zastosowaniach analitycznych wykorzystywane są wyładowania impulsowe zasilane napięciem o wartości 2 kV, szerokości impulsu około 10 ns i częstotliwości powtarzania równej 200 Hz [68], dając w wyniku impulsy prądu o wartości do 1 A i mocy do 2 kW. Dzięki niskiej średniej mocy wyładowania impulsowego, poddawane analizie próbki gazu nie są nadmiernie nagrzewane.

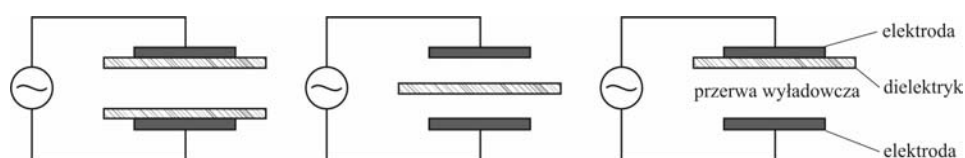
W przemyśle półprzewodnikowym, wykorzystanie plazmy impulsowej w procesach wytrawiania płytek obwodów drukowanych pozwala zmniejszyć niekorzystne oddziaływanie ładunku elektrycznego na wytrawiane kształty.

Zastosowanie impulsowego zasilania pozwala łatwiej uzyskać wyładowanie nietermiczne, układ zasilania nie wymaga systemu dopasowania

falowego, zakłócenia elektromagnetyczne są znacznie mniejsze i koszty instalacji niższe niż reaktorów z wyładowaniami RF. W zastosowaniach technologicznych reaktory z wyładowaniami impulsowymi pracują przy ciśnieniach rzędu 100 Pa, impulsach napięcia o wartości szczytowej równej 500 V i czasie trwania do 100  $\mu$ s, a ich wymiary geometryczne mogą być znacznie większe niż reaktorów z wyładowaniami typu RF i sięgają nawet kilka metrów sześciennych [68]. Zapewnia to znacznie większą wydajność czasowo-przestrzenną plazmy niż ta, którą uzyskuje się w reaktorach z wyładowaniami barierowymi i tym samym pozwala poddawać obróbce plazmochemicznej gazy wylotowe w dużej objętości.

## 2.8. Wyładowania dielektryczne barierowe DBDs

Wyładowania przy zmiennym wymuszeniu AC i w obecności bariery dielektrycznej są najczęściej wykorzystywane w technologiach nietermicznej plazmy. Typowe konfiguracje elektrod to układ płaski i cylindryczny (rys. 2.6), w których dielektryk (szkło, ceramika, polimer, substancja porowata), jest umieszczony na elektrodzie wysokonapięciowej, rzadziej na obu elektrodach, bądź między nimi, tworząc jedną lub więcej szczelin (przerw) wyładowczych. Powszechnie wykorzystywanym w praktyce reaktorem plazmowym z wyładowaniami barierowymi jest ozonator. Wytwarzany w nim, wskutek wyładowań w powietrzu lub w tlenie, ozon ( $O_3$ , trójcząsteczkowy tlen) znalazł zastosowanie, niemal od początku XX wieku, w procesach obróbki wody pitnej. Reaktory z wyładowaniami barierowymi dla celów obróbki wody zostaną omówione szerzej w rozdziale 3.

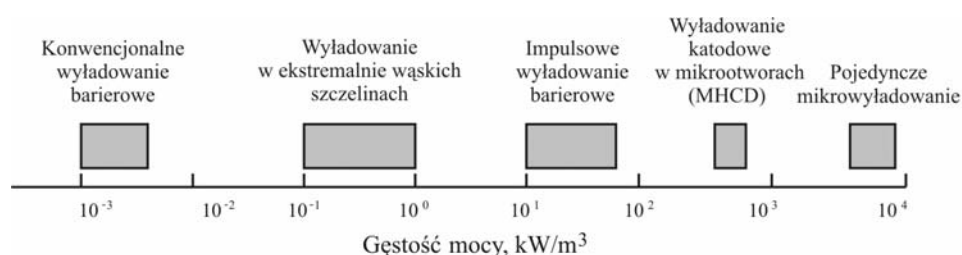


Rys. 2.6. Typowe konfiguracje elektrod reaktora z wyładowaniami barierowymi

Dielektryczne wyładowania barierowe wytwarzane są przy stosunkowo szerokim zakresie ciśnień, zwykle w od 0,1 do 1. atmosfery, przy napięciu przemiennym sięgającym w niektórych zastosowaniach nawet 100 kV i częstotliwości od kilku herców do setek kiloherców. Długość szczeliny wyładowczej, w zależności od zastosowań, może wynosić od 0,1 mm dla wyświetlaczy plazmowych, kilka milimetrów w ozonatorach i do kilku centymetrów w laserach CO<sub>2</sub> [68]. Bariera dielektryczna jest w większości reaktorów DBD wykonana ze szkła, kwarcu, materiałów ceramicznych bądź polimerów.

Rozróżnia się trzy podstawowe konfiguracje elektrod w wyładowaniach barierowych, które prowadzą do: 1) wyładowań objętościowych (z ang. volume discharges, VD), 2) powierzchniowych (surface discharges, SD) oraz 3) ko-planarnych (z ang. co-planar discharges). Budowane są też reaktory, w których występują wszystkie z wymienionych wyżej wyładowań [71, 72].

Na rysunku 2.7, opracowanym na podstawie [73], przedstawiono wartość gęstości objętościowej mocy w kW/m<sup>3</sup> dla wybranych wyładowań zachodzących w obecności bariery dielektrycznej. Jak z niego wynika, największą gęstość mocy rzędu 10<sup>4</sup> kW/m<sup>3</sup> można osiągnąć w pojedynczym mikrowyładowaniu, natomiast w klasycznym wyładowaniu barierowym uzyskiwane gęstości mocy są rzędu 10<sup>-3</sup> kW/m<sup>3</sup>, a więc kilka rzędów mniejsze.



Rys. 2.7. Gęstość mocy wybranych wyładowań w obecności bariery dielektrycznej [73]



Zwiększenie gęstości mocy wyładowań jest teoretycznie możliwe w dwojaki sposób:

- przez zastosowanie specjalnych konstrukcji elektrod i dielektryków, tak, aby wyładowania zachodziły w bardzo wąskich szczelinach wyładowczych ( $10^{-1}$  kW/m<sup>3</sup>), bądź w mikro-otworach ( $10^2 \div 10^3$  kW/m<sup>3</sup>),
- poprzez zastosowanie impulsowych źródeł zasilania ( $10^2 \div 10^3$  kW/m<sup>3</sup>).

Odpowiednia geometria elektrod reaktora, rodzaj dielektryka oraz sposób zasilania w energię elektryczną decydują o parametrach wytwarzanej plazmy oraz możliwościach i charakterze pracy reaktora.

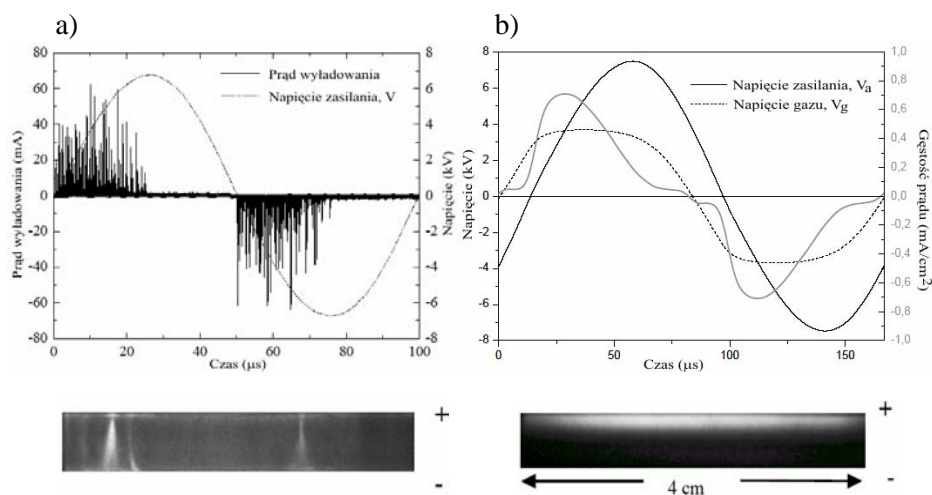
## **2.9. Wyładowania jarzeniowe przy ciśnieniu atmosferycznym**

Większość procesów plazmowych wykorzystujących wyładowanie jarzeniowe pracuje przy ciśnieniu niskim bądź bardzo niskim, co stanowi istotne ograniczenie w ich przemysłowych zastosowaniach. I tak, na przykład, obróbka plazmowa długich materiałów (tkanin) byłaby niemożliwa w wyładowaniu jarzeniowym generowanym przy ciśnieniu bliskim próżni z powodu nieakceptowalnie wysokich kosztów aparatury, a w niektórych procesach również z powodu niemożliwości osiągnięcia w komorze próżniowej wymaganego wysokiego ciśnienia par związków chemicznych nakładanych na podłoże [68]. Ponadto, obróbka powierzchniowa materiałów w przemyśle półprzewodnikowym wymaga, aby wyładowanie było jednorodne, bez obecności iskier czy łuku, czego nie zapewniają klasyczne wyładowania barierowe przy ciśnieniu atmosferycznym.

Badacze wyładowań jarzeniowych przy ciśnieniu atmosferycznym, a wśród nich Prof. Satiko Okazaki z Uniwersytetu Sophia w Tokio [74÷79], podali trzy niezbędne warunki, aby w szczelinie wyładowczej reaktora plazmowego, przy ciśnieniu atmosferycznym, zachodziło jednorodne wyładowanie jarzeniowe APG (z ang. Atmospheric Pressure Glow): Należą do nich:

- obecność dielektryka pomiędzy elektrodami reaktora plazmowego,

- odpowiedni rodzaj gazu plazmotwórczego – hel, argon, neon,
- częstotliwość napięcia zasilającego powyżej 1000 Hz.



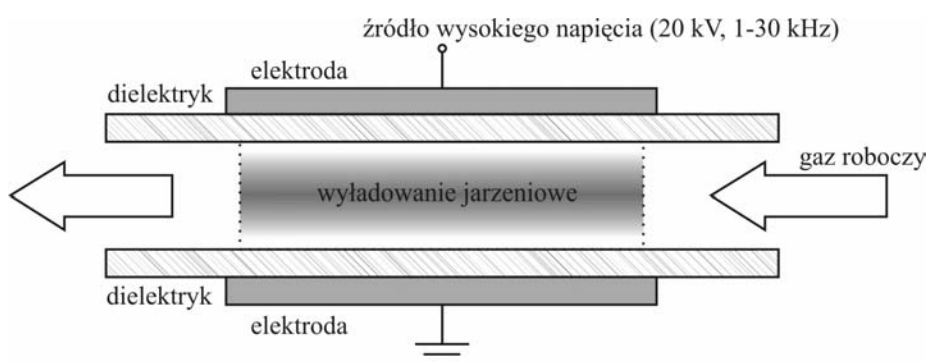
Rys. 2.8. Przebieg prądu wyładowania i jego wygląd w przestrzeni wyładowczej: a) wyładowanie barierowe, b) wyładowanie jarzeniowe [67]

W pracy [67] podano różnicę w przebiegu prądu wyładowania dla wyładowań barierowych i wyładowań jarzeniowych przy ciśnieniu atmosferycznym. W obrazie wyładowania barierowego (rys. 2.8a) obserwuje się wyraźne włókna (filamenty), a w przebiegu prądu liczne mikroimpulsy. Natomiast wyładowanie jarzeniowe APG charakteryzuje jednorodna poświata a prąd, w każdym półokresie sinusoidalnego napięcia zasilającego, ma kształt pojedynczego impulsu (Rys. 2.8b).

Prof. Okazaki, wraz ze swoim zespołem, wykazała ponadto, że można uzyskać stabilne wyładowanie jarzeniowe przy ciśnieniu atmosferycznym, w dowolnym gazie (powietrze, tlen, azot, wodór) i przy częstotliwości technicznej 50 Hz, ale w obecności elektrod siatkowych (z ang. mesh electrode) [78, 79].

Korzyści ze stosowania wyładowań jarzeniowych w procesach plazmo-chemicznych wynikają z braku konieczności zapewnienia próżni w komorze wyładowczej, co pozwala znacznie obniżyć koszty i złożo-

ność instalacji. Generowana wyładowaniami jarzeniowymi „zimna” plazma pozwala poddawać obróbce plazmowej takie, nieodporne na wysokie temperatury, materiały, jak: guma, tekstylia i biomateriały. Główne zastosowania wyładowań jarzeniowych to modyfikacja powierzchni materiałów, sterylizacja, polimeryzacja a także, w mniejszym zakresie, wytwarzanie ozonu. Typową konfigurację elektrod reaktora, z wyładowaniami jarzeniowymi generowanymi przy ciśnieniu atmosferycznym, do zastosowań w procesie polimeryzacji, przedstawia rysunek 2.9 [68]. Obie elektrody, odległe od siebie o kilka mm, pokryte są warstwą dielektryka i zasilane wysokim napięciem o wartości ok. 20 kV i częstotliwości od 1 do 30 kHz [67, 80÷84].

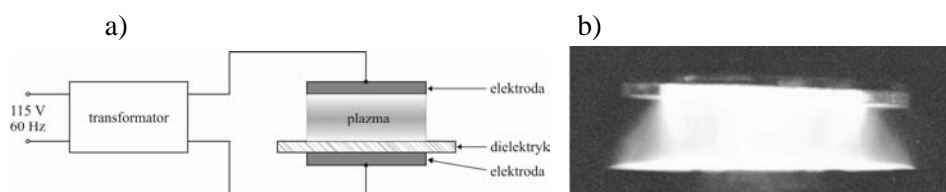


Rys. 2.9. Konfiguracja elektrod reaktora z wyładowaniami jarzeniowymi [68]

Odmianą wyładowań jarzeniowych są występujące w obecności bariery dielektrycznej o wysokiej rezystywności tzw. wyładowania rezystywne (Rys. 2.10a) [80, 81]. Zamiast materiału dielektrycznego, na jednej z elektrod umieszczona jest płyta o wysokiej, rzędu megaomów, rezystywności, która zapobiega wyładowaniom iskrowym i ogranicza wartość prądu wyładowania dzięki rozproszonemu obciążeniu rezystancyjnemu.

Wyładowania „rezystywne” mogą być wytwarzane zarówno przy wymuszeniu stałym, jak i przemiennym o częstotliwości technicznej. W atmosferze helu wyładowania rezystywne są jednorodne, wytwarzana plazma jest przestrzennie homogeniczna, bez obecności filamentów, ty-

powych dla plazmy wyładowań barierowych, i może być podtrzymywana nawet do kilku minut przy długości szczeliny wyładowczej do kilku centymetrów (Rys. 2.10b) [80, 81, 84].



Rys. 2.10. Schemat reaktora z wyładowaniem barierowym rezystywnym (a) i zdjęcie wyładowania (b) [80]

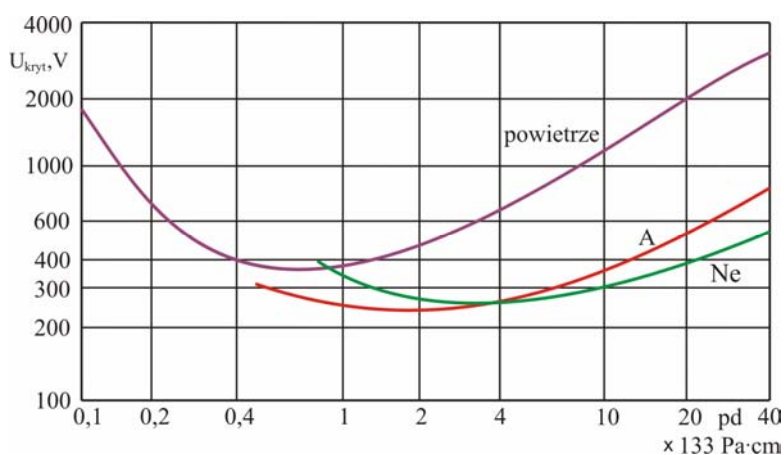
## 2.10. Wyładowania w mikro otworach i kapilarach

Jak wykazał Friedrich Paschen [64, 65, 85], napięcie zapłonu wyładowania samoistnego w gazie  $U_z$  jest funkcją jego ciśnienia  $p$  i odległości między elektrodami  $d$ , według zależności:  $U_z = f(pd)$ . Na rysunku 2.11 pokazano przebieg krzywej Paschena dla wybranych gazów. Krzywa Paschena łączy punkty, w których jeden elektron pierwotny, wytworzywszy lawinę, reprodukuje się sam, czyli stanowi granicę obszaru, powyżej którego jeden elektron pierwotny wytwarza więcej niż jeden elektron wtórny, zaś poniżej którego rozciąga się obszar niewystarczającej reprodukcji.

Wytrzymałość dielektryczna gazu na przebicie, zależy od rodzaju i składu gazu, materiału elektrod, ale przede wszystkim od iloczynu ciśnienia gazu i odległości międzyelektrodowej. Jak wynika z krzywych Paschena, generacja wyładowań barierowych w gazach przy ciśnieniu atmosferycznym jest możliwa nawet przy niskich napięciach rzędu kilkuset woltów, w bardzo ograniczonych przestrzeniach (szczelinach), o wymiarach od 10 m do 500 m. Wyładowania występujące w tak ograniczonych przestrzeniach przy ciśnieniu atmosferycznym dzieli się na: katodowe wnekowe (z ang. hollow cathode, HC), mikro-katodowe wneko-

we (z ang. microhollow cathode, MHC) i kapilarne (z ang. capillary plasma electrode, CPE).

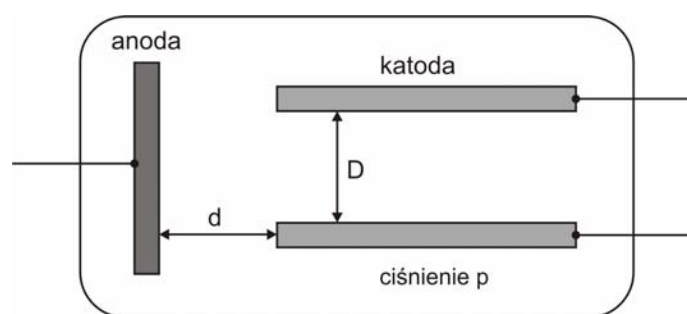
Idea budowy elektrod rektora z wyładowaniami mikro-katodowymi wnątkowymi MHC jest przedstawiona na rysunku 2. 12. Przebieg wyładowania w takiej konfiguracji elektrod jest następujący: w początkowej fazie, dla niewielkich prądów, powstaje wstępne wyładowanie jarzeniowe, w którym region katodowego spadku napięcia znajduje się w znacznym oddaleniu od katody.



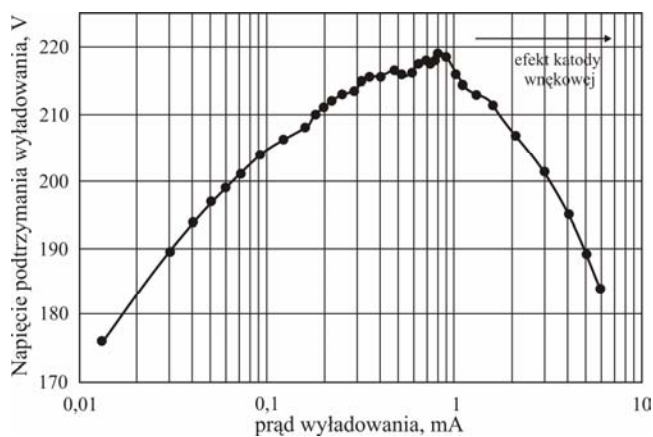
Rys. 2.11. Przebieg krzywych Paschena dla powietrza, argonu i neonu

Wraz ze wzrostem wartości prądu wyładowania, region dodatniego ładunku przestrzennego przesuwa się w stronę katody i wchodzi do wnętrza otworu. W ten sposób w otworze katody powstaje dodatnia kolumna ładunku przestrzennego, oddzielonego dwiema warstwami przykatodowymi, który staje się tzw. wirtualną anodą. Rozkład pola elektrycznego we wnętrzu otworu katody ulega zmianie, z początkowo osiowego (wzdłuż długości otworu), do promieniowego (wzdłuż średnicy  $D$  otworu) i tworzy „studnię potencjału”, która generuje siłę przyspieszającą elektrony wzdłuż promienia i może prowadzić, przy pewnej wartości prądu wyładowania, do ruchu oscylacyjnego elektronów wewnątrz otworu, tworząc tzw. wahadło elektronowe [87].

Na rysunku 2.13 przedstawiono charakterystykę prądowo-napięciową wyładowania typu MHC w neonie przy ciśnieniu 380 mmHg [87]. Jak widać, w podanych warunkach, wyładowanie mikrokatodowe jest obserwowane dla prądu wyładowania powyżej 1 mA i charakteryzuje się ujemną charakterystyką prądowo-napięciową – przyrost wartości prądu powoduje spadek wartości napięcia niezbędnego do podtrzymania wyładowania.



Rys. 2.12. Szkic elektrod reaktora z wyładowaniami w mikro-otworach w katodzie, typu MHC



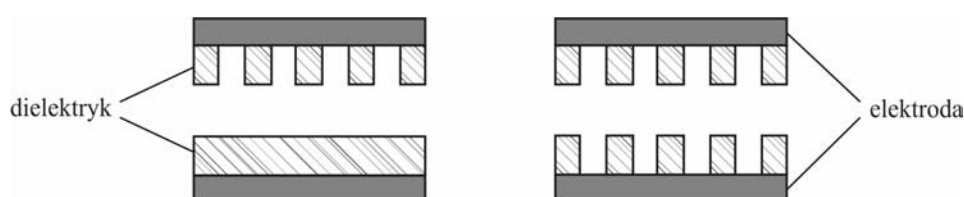
Rys. 2.13. Zależność prądu od napięcia wyładowania typu MHC [87]

Typowe warunki w jakich mogą wystąpić wyładowania MHC i parametry reaktora to:

- średnica otworu w katodzie,  $D = 100 \text{ m}$
- odstęp między elektrodami  $d = 200 \text{ m}$

- odstęp między katodą a wirtualną anodą 10 m
- energia elektronów  $>10$  eV
- gęstość elektronów  $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
- temperatura gazu 2000 K.

Na rysunku 2.14 przedstawiono konfiguracje elektrod, przy których możliwe jest uzyskanie kapilarnych wyładowań elektrycznych.



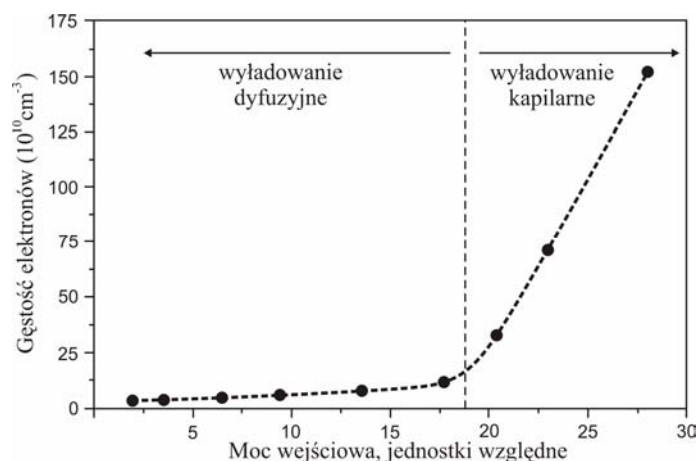
Rys. 2.14. Elektrody reaktorów z dielektrykiem z kapilarami [81]

Podczas wyładowań kapilarnych, podobnie do wyładowań katodowych, obserwowane są dwa podstawowe rodzaje generowanej plazmy, w zależności od rodzaju dielektryka, geometrii elektrod, natężenia pola elektrycznego, a przede wszystkim od częstotliwości źródła zasilającego. Napiecie zapłonu wyładowań kapilarnych zawiera się w granicach od 140 V do 300 V, w zależności od rodzaju gazu. Wyładowania w mikro-otworach są dobrym źródłem promieniowania ultrafioletowego UV.

W wyładowaniach barierowych, obecność dielektryka z cylindrycznymi otworami, zwanymi kapilarami, może znacznie zwiększyć efektywność generacji plazmy i wzrost gęstości elektronów. Jak podano w pracy [81], stosunek długości kapilary do jej średnicy powinien wynosić co najmniej 10/1. Po przekroczeniu przez moc wejściową pewnej krytycznej wartości (rysunek 2.15), następuje w takim reaktorze „przełączenie” z trybu pracy, w którym wytwarzana jest typowa plazma jarzeniowa przy ciśnieniu atmosferycznym, opisana w rozdziale 2.9, na tryb pracy zwany „plasma-jet”. Wokół otworów kapilar pojawiają się nagle intensywnie świeące obszary, będące źródłem strumienia elektronów o wysokiej gę-

stości, które w miarę wzrostu mocy ze źródła zasilającego „zlewają się” ze sobą, tworząc jednorodne wyładowanie jarzeniowe. Parametry wyładowań kapilarnych zależą od stosunku średnicy kapilary do jej długości oraz od częstotliwości źródła zasilającego, i wynoszą [81]:

- maksymalny prąd wyładowania do 2 A, przy gęstości prądu  $80 \text{ mA/cm}^2$
- gęstość elektronów w trybie „plasma-jet”  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$
- średnia energia elektronów  $5 \div 6 \text{ eV}$
- gęstość mocy od  $1.5 \text{ W/cm}^3$  w helu do nawet  $20 \text{ W/cm}^3$  w powietrzu.



Rys. 2.15. Gęstość elektronów w funkcji mocy wejściowej w wyładowaniu kapilarnym; opracowano na podstawie [81]

Wyładowania kapilarne mogą być wytwarzane przy ciśnieniu atmosferycznym w niemal wszystkich rodzajach i mieszaninach gazów, takich jak: Ne, Ar, He-N<sub>2</sub>, He-powietrze, He-H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, powietrze-H<sub>2</sub>O.

## 2.11. Wyładowania mikrofalowe

Wyładowania mikrofalowe (zwane indukcyjnymi) powstają na skutek wprowadzenia do gazu energii elektrycznej za pomocą pola elektromagnetycznego o wysokiej częstotliwości w zakresie od 300 MHz do 10 GHz. Plazma wyładowań mikrofalowych, może być indukowana



w reaktorach plazmowych o różnych konstrukcjach. Zwykle są to urządzenia bezelektrodowe, pracujące przy ciśnieniach od 0,1 Pa do kilku atmosfer, w gazach szlachetnych i molekularnych. Najbardziej rozpowszechnione są plazmotrony indukcyjne, w których jonizacja strumienia gazu następuje na skutek jego przepływu wewnątrz cewki wzbudzającej o wysokiej częstotliwości. Konstruowane są także plazmotrony pojemnościowe, mikrofalowe palniki plazmowe (z ang. plasma torch), oraz generatory wnekowe. Moce budowanych reaktorów mikrofalowych zawierają się w zakresie od kilku watów do setek kilowatów. Ich główne zastosowania związane są z obróbką cieplną we współczesnej elektrometalurgii, bowiem plazma mikrofalowa ma takie zalety jak: bardzo wysoka temperatura, duży stopień czystości ośrodka grzejącego i swoboda w doborze atmosfery gazowej [88, 108].

## 2.12. Wyładowania łukowe

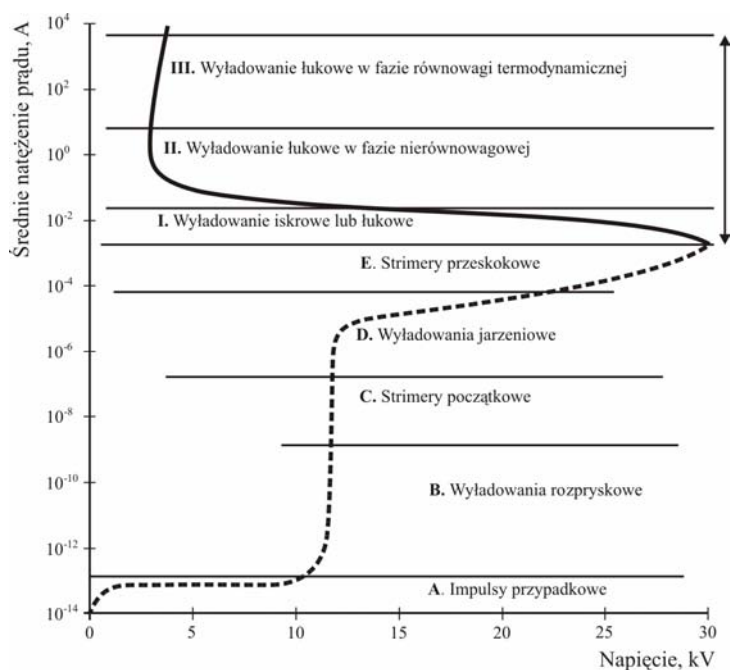
Wyładowanie łukowe zachodzi w szerokim zakresie ciśnień, od 0,1 Pa do 10 MPa. Jego cechą charakterystyczną jest relatywnie niski spadek potencjału na elektrodach – zwykle poniżej 100 V, wysoka gęstość natężenia prądu ( $1 \div 10^4$ ) A/cm<sup>2</sup> i znaczna intensywność świecenia kolumny łukowej. Charakterystyka prądowo-napięciowa wyładowania łukowego, przy ciśnieniu atmosferycznym ma 3 podstawowe zakresy (rys. 2.16):

- zakres I, w którym niestabilne wyładowanie iskrowe przechodzi w niestabilne wyładowanie łukowe
- zakres II, w którym wyładowanie łukowe jest w stanie nierównowagi termodynamicznej. Gęstość elektronów w tym zakresie wynosi ( $10^{19} \div 10^{21}$ ) m<sup>-3</sup>, energia elektronów (0,2 ÷ 2) eV, średnia energia gazu (0,025 ÷ 0,5) eV oraz natężenie prądu (1 ÷ 50) A,
- zakres III – wyładowanie łukowe jest w stanie równowagi termodynamicznej. Wg Rotha [2] gęstość elektronów w tym stanie wynosi

$(10^{22} \div 10^{25}) \text{ cm}^{-3}$ , energia elektronów i cząsteczek gazu  $(1 \div 10) \text{ eV}$ , zaś natężenie prądu  $(50 \div 1000) \text{ A}$ .

Na rys. 2.16 pokazano również zakresy prądów i napięć dla innych niż łukowe wyładowań elektrycznych, które wykorzystuje się do wytwarzania plazmy nietermicznej.

Łuk elektryczny płonący stabilnie między elektrodami reaktora plazmowego jest źródłem plazmy nietermicznej będącej w stanie równowagi termodynamicznej i w tej postaci jego zastosowanie w technologiach związanych z oczyszczaniem gazów jest ograniczone do spalania termicznego.



Rys. 2.16. Charakterystyka prądowo – napięciowa wyładowania elektrycznego w powietrzu, ze szczególnym uwzględnieniem wyładowania łukowego [2, 26]

Próby zastosowania łuku elektrycznego w technologiach związanych z ochroną środowiska ograniczają się do spalania odpadów stałych. Przy unieszkodliwianiu gazów przemysłowych (np. gazy wylotowe elektrowni

lub elektrociepłowni), łuk elektryczny jest mało przydatny, bowiem wytwarzana nim plazma nie jest w stanie skutecznie spenetrować przestrzeni wypełnionej zanieczyszczonym powietrzem, w sposób umożliwiającą usunięcie zawartych w nim zanieczyszczeń.

Z punktu widzenia zastosowań łuku w ochronie środowiska interesującym jest wyładowanie łukowe w fazie nierównowagowej (zakres II na rysunku 2.16). Przykładem takiego wyładowania może być ślizgające się wyładowanie łukowe, znane w literaturze światowej pod nazwą ślizgający się łuk („gliding arc”), w którym wyładowanie przemieszcza się wzdłuż elektrod wyładowczych ruchem ślizgowym, zmieniając istotnie swoje właściwości fizyczne a mianowicie: od charakterystycznych dla plazmy znajdującej się w stanie równowagi termodynamicznej do typowych dla plazmy nierównowagowej [4, 5, 123÷127]. Reaktory plazmy nietermicznej ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, mogą być budowane jako dwu-, trzy- i wieloelektrodowe. Charakteryzują się prostą budową, niewielkimi wymaganiami w stosunku do układu zasilania, mogą pracować z praktycznie wszystkimi rodzajami gazów i ich mieszanin, reaktywnych i niereaktywnych, suchych i zawierających pary cieczy. Reaktory plazmy ślizgającego się wyładowania łukowego przedstawiono w rozdziale 3.3.

### **2.13. Podsumowanie**

Plazmę nietermiczną i nierównowagową generuje się za pomocą wyładowań elektrycznych, przy czym niemal każdy rodzaj wyładowania może być wykorzystywany do wytwarzania plazmy o wymaganych przez proces plazmowy parametrach. Generacja zimnej plazmy w warunkach próżni bądź wysokiego podciśnienia nie następuje istotnych trudności, nawet w komorach wyładowczych o dużej objętości, ale wytworzenie takiej próżni jest drogie i wymaga specjalnych konstrukcji reaktorów plazmowych. Stąd potrzeba poszukiwania reaktorów, w których zimną nie-

równowagową plazmę można generować w warunkach ciśnienia atmosferycznego.

Z przedstawionego w rozdziale 2 przeglądu wynika, że obiecującym źródłem plazmy, dla zastosowań na skalę przemysłową, są wyładowania w obecności bariery dielektrycznej zasilane energią impulsową, matryce reaktorów z wyładowaniami typu MHC oraz ślizgające się wyładowanie łukowe w układach wieloelektrodowych. Tym reaktorom i ich układom zasilania poświęcone są następane rozdziały.

### 3. REAKTORY PLAZMY NIETERMICZNEJ

Główne cechy technologii plazmowych w zastosowaniach związanych z oczyszczaniem gazów wylotowych to: bezodpadowość, możliwość prowadzenia procesów oczyszczania gazów w dużej objętości przy ciśnieniu atmosferycznym, selektywność energii, potencjalnie duży obszar zastosowań. W tabelicy 3.1 przedstawiono wybrane typy reaktorów plazmowych, ich główne zastosowania oraz sposoby ich zasilania w energię elektryczną.

Tablica 3.1. Reaktory plazmowe i ich zastosowania

Rodzaj reaktor plazmowego	Zastosowania	Sposób zasilania
Reaktory z wyładowaniami barierowymi – DBDs.	Synteza ozonu, konwersja metanu.	Napięcie przemiennie częstotliwości sieciowej i podwyższonej.
Reaktory z upakowaniem dielektrycznym – bad packed.	Rozkład $SO_x$ i $NO_x$ , konwersja hydrokarbonów.	Napięcie stałe, impulsowe oraz przemiennie.
Reaktory koronowe.	Filtracja pyłów, wytwarzanie ozonu.	Napięcie impulsowe, stałe.
Reaktory z mikrowyładowaniami – hollow cathode discharges.	Sterylizacja, obróbka materiałów organicznych.	Napięcie impulsowe, wysoka częstotliwość.
Reaktory z wyładowaniami powierzchniowymi co-planar.	Unieszkodliwianie tlenków azotu, lotnych substancji organicznych.	Napięcie sinusoidalne podwyższonej i wysokiej częstotliwości.
Reaktory łukowe (plazmotrony).	Syntezy chemiczne, topienie, spawanie, obróbka powierzchniowa.	Napięcie stałe, jednokierunkowe, napięcie sinusoidalne częstotliwości sieciowej.
Reaktory quasi-łukowe (ze ślizgającym się łukiem).	Neutralizacja toksycznych gazów, unieszkodliwianie $SO_x$ i $NO_x$ .	Napięcie stałe, impulsowe oraz przemiennie.
Reaktory mikrofalowe.	Usuwanie lotnych substancji organicznych VOC.	Napięcie o częstotliwości rzędu mega i giga herców.

Niezależnie od rodzaju wyładowań wykorzystywanych do generacji plazmy, reaktory plazmy nietermicznej dla zastosowań przemysłowych, łączą wiele cech wspólnych. Są to na ogół urządzenia o dużej mocy, wy-

magające zasilania energią elektryczną o wysokim napięciu od kilku do kilkunastu kilowoltów i częstotliwości sieciowej lub podwyższonej. Układy zasilania reaktorów plazmowych, stanowiące zawsze nieodłączną część systemu generacji plazmy, aby spełnić wymagania tych bardzo nietypowych odbiorników energii elektrycznej, wymagają specjalnych metod projektowania i konstrukcji.

Reaktory plazmowe, w których plazma wytwarzana jest za pomocą wyładowań elektrycznych w gazie są urządzeniami technologicznymi, bowiem plazmy nie można przechowywać ani transportować i musimy ją wytwarzać w miejscu, gdzie jest wykorzystywana w procesie technologicznym. W dalszej części omówiono dwa rodzaje reaktorów nietermicznej plazmy:

- z wyładowaniami barierowymi (ozonatory),
- ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym (reaktory typu „gliding arc”).

Taki wybór wynika z kilku powodów: oba rodzaje wyładowań elektrycznych wytwarzają nietermiczną plazmę przy ciśnieniu atmosferycznym, konstrukcja reaktorów jest dobrze opracowana i stosunkowo prosta, potencjalny obszar zastosowań duży, zwłaszcza w procesach ochrony środowiska i w rozwijanych obecnie biotechnologiach, oba reaktory mogą być zasilane z podobnych źródeł wykorzystujących właściwości nieliniowych obwodów magnetycznych transformatorów i w końcu, oba rodzaje reaktorów plazmowych i ich układy zasilania są przedmiotem badań prowadzonych przez autorkę monografii i kierowany przez nią zespół [3, 6, 88÷90, 94÷105]

### **3.1. Reaktory z wyładowaniami barierowymi – ozonatory**

Terminu ozonator używa się zarówno do określenia urządzenia do wytwarzania ozonu, jak również do elementu wyładowczego, w którym w wyładowaniach dielektrycznych barierowych odbywa się właściwy

proces syntezy ozonu. Ozonator jako urządzenie do produkcji ozonu, to zespół kilku elementów, takich jak: zasilacz, elementy wyładowcze, układy przygotowania i dostarczania powietrza bądź tlenu, układy zabezpieczeń [82, 91, 93].

Zastosowanie ozonu, wytwarzanego podczas wyładowań barierowych w powietrzu i tlenie do obróbki wody pitnej, jest najbardziej technologicznie zaawansowanym i stosowanym powszechnie w praktyce procesem plazmowym. W większości wysoko uprzemysłowionych krajów na świecie całkowicie zaniechano lub istotnie ograniczono stosowanie chloru, fluoru, etylenu, bromku metylu i innych związków chemicznych o właściwościach utleniających i bakteriobójczych.

Aktualnie, obok procesów obróbki wody i ścieków, rozwijane są także inne zastosowania plazmy wyładowań barierowych, które obejmują zagadnienia związane z ochroną środowiska oraz zastosowania biologiczne i medyczne. W większości omawianych zastosowań wykorzystuje się szczególne właściwości wytwarzanego podczas wyładowań ozonu, do których należą:

- kilka tysięcy razy większa zdolność do usuwania bakterii, grzybów, pleśni i przetrwalników drożdży od konwencjonalnych związków chemicznych typu chlor, fluor czy brom, w znacznie krótszym czasie i mniejszych dawkach;
- neutralizacja pH oraz poprawa koloru i smaku wody;
- biologiczny rozkład substancji organicznych;
- strącanie metali ciężkich oraz usuwanie nadmiaru żelaza, manganu i siarki, dzięki, inicjowanemu przez ozon, procesowi mikroflokulacji;
- brak ubocznych produktów rozpadu ozonu i krótki czas jego połowicznego rozpadu na tlen cząsteczkowy;
- wytwarzanie ozonu w miejscu, w którym jest stosowany, co wyklucza konieczność transportu.


Wymienione właściwości ozonu sprawiają, że jego zakres zastosowań wciąż się rozszerza. Obecnie, obok obróbki wody pitnej, wykorzy-

stuje się ozon i plazmę wyładowań elektrycznych w procesach sterylizacji powietrza, wody, gleby, powierzchni i opakowań, redukcji tlenków azotu z gazów spalinowych pochodzących ze spalania gazu naturalnego, usuwania tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) dwutlenku siarki ( $\text{SO}_2$ ), metali ciężkich i lotnych substancji organicznych (VOC), powstających w procesach malowania, lakierowania, spalania odpadów poszpitalnych i w innych procesach chemicznych.

### 3.1.1. Proces syntezy ozonu w wyładowaniach barierowych

Proces formowania ozonu w reaktorze z wyładowaniami barierowymi można podzielić na 3 zasadnicze etapy (Tablica 3.2):

Tablica 3.2 Etapy procesu syntezy ozonu w wyładowaniach barierowych

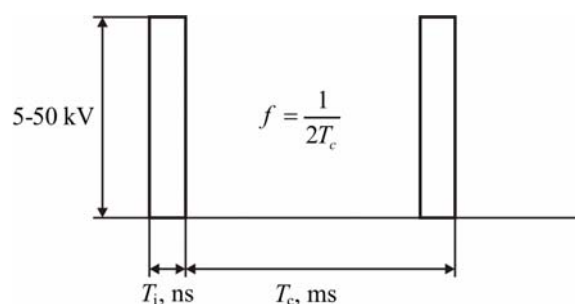
Zjawisko	<i>Rozbijanie</i>	<i>Rekombinacja</i>	<i>Dyfuzja</i>
Reakcja chemiczna	$e + \text{O}_2 = 2 \text{O}$ $e + \text{N}_2 = 2 \text{N}$	$\text{O} + \text{O}_2 = \text{O}_3$ $\text{N} + \text{O}_x = \text{NO}_x$	$\text{O}_3$ 
czas trwania	$10^{-9}$ s	$10^{-6}$ s	$10^{-3}$ s

- Rozbijanie (jonizacja i dysocjacja), w którym po przekroczeniu przez napięcie zasilające wartości zapłonu wyładowania, następują bardzo szybkie procesy jonizacji, generujące nośniki ładunków, niezbędne do przepływu prądu, którymi w czystym tle są elektrony oraz dodatnie i ujemne jony tlenu, natomiast w powietrzu, także jony azotu. Jednocześnie, elektrony odpowiedzialne za przepływ prądu w mikrowyładowaniu powodują dysocjację cząstek tlenu i azotu, zgodnie z reakcjami podanymi w tablicy 3.2. Procesy jonizacji i dysocjacji, należące do pierwszego etapu cyklu syntezy ozonu, są bardzo szybkie i nie trwają dłużej niż czas pojedynczego impulsu prądu, tj. kilka nanosekund.
- Rekombinacja, znacznie wolniejszy etap (rzędu kilku mikrosekund), w którym następuje formowanie cząstek ozonu. Gdyby wszystkie ato-



my tlenu, wytworzone w pierwszym etapie procesu, wzięły udział w formowaniu ozonu, to sprawność jego generacji byłaby największa. Badania wykazują, że jest to możliwe tylko dla bardzo słabych mikrowyładowań [83, 86, 93, 106]. Podczas silniejszych wyładowań i większych energii dostarczanych do przestrzeni wyładowań, zaczynają zachodzić dodatkowe reakcje, w wyniku których atomy tlenu mogą łączyć się w tlen dwucząsteczkowy, oraz cząstki ozonu reagują z atomami tlenu. Istnieje zatem pewna optymalna wartość intensywności wyładowań, zapewniająca maksymalną sprawność procesu syntezy ozonu.

- Dyfuzja, ostatni etap cyklu, w którym cząstki ozonu opuszczają szczelinę wyładowczą. Ten etap trwa milisekundy i przesądza o czasie trwania całego cyklu. Następny impuls energii powinien pojawić się dopiero po zakończeniu tego etapu, w przeciwnym razie, część uformowanych w poprzednim etapie cząstek ozonu ulegnie destrukcji i sprawność procesu syntezy ozonu w wyładowaniach barierowych zmaleje.



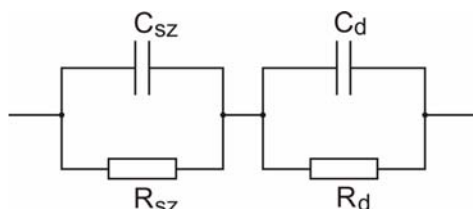
Rys. 3.1. Teoretyczny przebieg napięcia zasilającego zapewniający realizację cyklu procesu syntezy ozonu,  $T_i$  – czas trwania pojedynczego impulsu,  $T_c$  – czas trwania cyklu,  $f$  – wymagana częstotliwość impulsów

Dla tak scharakteryzowanego cyklu procesu syntezy ozonu w wyładowaniu barierowym, teoretyczny przebieg impulsu napięcia zapewniającego jego realizację przy maksymalnej sprawności, przedstawiono na rysunku 3.1. Czas etapu dyfuzji, rzędu milisekund, przesądza o czasie trwania

nia pojedynczego cyklu syntezy ozonu i pozwala oszacować częstotliwość napięcia zasilającego w granicach (50÷1000) Hz.

### 3.1.2. Reaktor z wyładowaniami barierowymi jako odbiornik energii elektrycznej

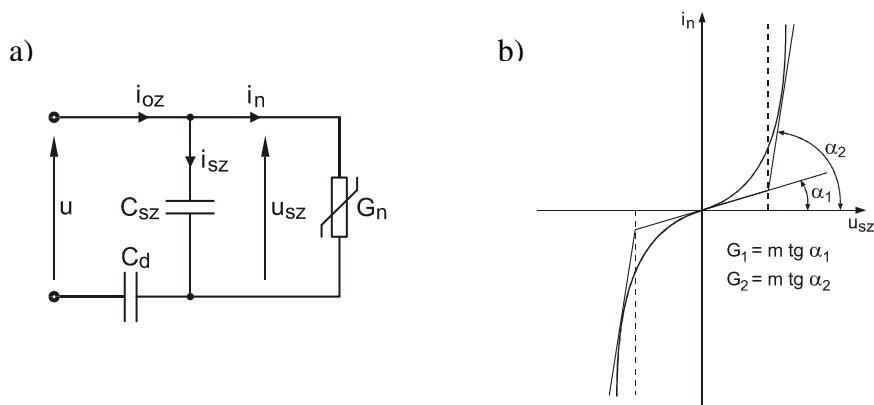
Reaktor z wyładowaniami barierowymi, jako odbiornik energii elektrycznej, stanowi obciążenie pojemnościowo-rezystancyjne ze zmienną pojemnością. Zmiana pojemności wynika stąd, że podczas fazy wyładowań, gdy szczelina gazowa przewodzi, o pojemności układu decyduje wartość pojemności  $C_d$  dielektryka stałego. Podczas przerw w wyładowaniach, pojemność elementu wyładowczego określona jest zastępczą pojemnością szeregowo połączonych: warstwy dielektryka  $C_d$  i nieprzewodzącej gazowej przestrzeni wyładowczej  $C_{sz}$ . Zatem, jeżeli w reaktorze nie zachodzą wyładowania, to odwzorowujemy go za pomocą uwarstwionego kondensatora rzeczywistego (Rys. 3.2).



Rys. 3.2. Schemat zastępczy elementu wyładowczego bez wyładowań w szczelinie gazowej

Przy zasilaniu napięciem przemiennym, rozkład napięć w układzie z rysunku 3.2 podyktowany jest pojemnościowym prądem przesunięcia. Wówczas można pominąć w schemacie rezystancję modelującą prąd upływu dielektryka. Gdy napięcie na szczelinie wyładowczej przekroczy wartość niezbędną do zapłonu wyładowań, gaz zostaje zjonizowany i szczelina powietrzna traci swe właściwości izolacyjne. Na prąd przesunięcia nakłada się prąd przewodzenia i schemat zastępczy reaktora z wyładowaniami barierowymi wymaga uzupełnień. W wielu rozważaniach

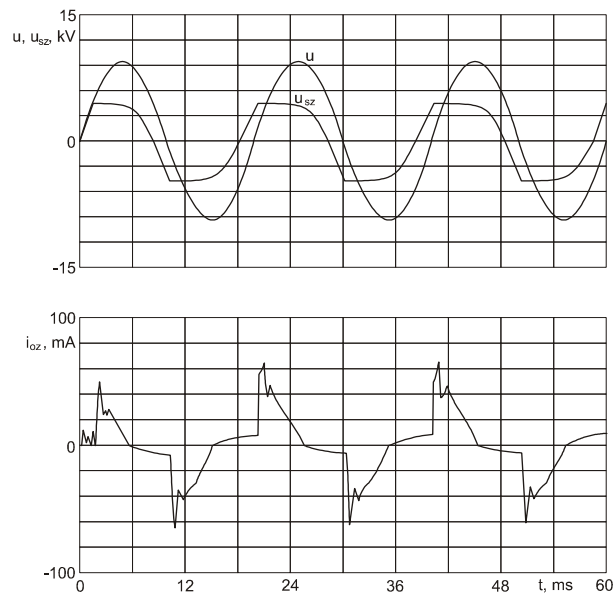
przyjmuje się, że szczelina powietrzna podczas wyładowań jest zwierana, co odpowiada założeniu, że napięcie zapłonu wyładowań  $U_z$  i napięcie gaśnięcia  $U_g$  są sobie równe. Nie jest to zgodne z wynikami doświadczeń. W rzeczywistości, napięcie gaśnięcia stanowi od  $(0,6 \div 0,9) U_z$  i zależy od składu chemicznego gazu zawartego w szczelinie, jego ciśnienia, rezystywności powierzchni elektrod i ich wymiarów [89, 107, 108]. Bliższe wynikiem doświadczenia jest założenie, że napięcie na szczelinie jest stałe i równe napięciu zapłonu  $U_z$ , co potwierdzają liczne badania [93, 107]. Mimo że proces zapłonu i gaśnięcia wyładowań jest nieustannie powtarzany w różnych miejscach szczeliny i w różnym czasie, to nawet podczas intensywnych wyładowań uśredniona wartość napięcia na szczelinie wyładowczej jest stała [86, 93]. Takie założenie stało się podstawą jednego z najczęściej stosowanych w praktyce schematów zastępczych reaktora z wyładowaniami barierowymi w którym, równoległe do pojemności modelującej szczelinę wyładowczą, włącza się idealne źródła napięcia o zmiennej biegunowości i sile elektromotorycznej równej napięciu zapłonu wyładowań [107].



Rys. 3.3. Schemat zastępczy reaktora z wyładowaniami barierowymi (a), oraz charakterystyka prądowo – napięciowa nieliniowej konduktancji  $G_n$  (b)

W pracy [101] zaproponowano schemat zastępczy reaktora z wyładowaniami barierowymi, przedstawiony na rysunku 3.3 w którym, rów-

nolegle do kondensatora modelującego pojemność przestrzeni wyładowczej, włączono nieliniową konduktancję o charakterystyce prądowo-napięciowej  $i_n = f(u_{sz})$ , odwzorowującej zmiany przewodności szczeliny wyładowczej przed i podczas wyładowań. Można także przyjąć, że zależność prądu od napięcia ma kształt charakterystyki przekaźnikowej (linia przerywana na rys. 3.3), co odpowiada założeniu stałego, równego  $U_z$ , napięcia na szczeliny podczas wyładowań. Korzystając z zaproponowanego schematu zastępczego, przeprowadzono symulację pracy elementu wyładowczego, zasilanego ze źródła napięcia sinusoidalnego, w programie analizy obwodów elektrycznych MicroCap3, której wyniki przedstawiono na rysunku 3. 4.



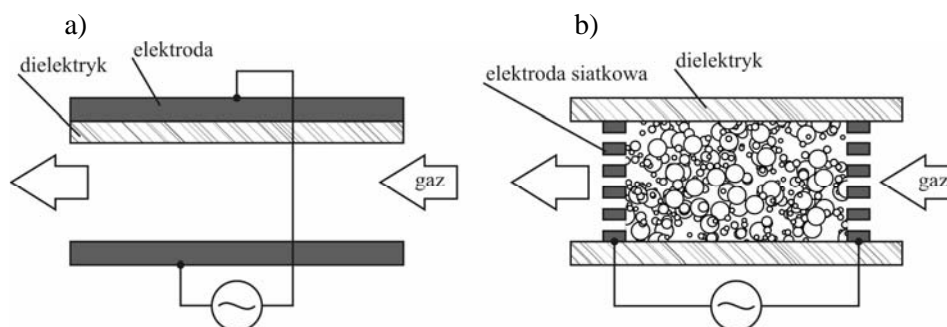
Rys. 3.4. Przebiegi chwilowych wartości napięcia źródła  $u$ , napięcia na szczeliny wyładowczej  $u_{sz}$  i prądu reaktora  $i_{oz}$ , uzyskane na drodze symulacji numerycznej, z wykorzystaniem schematu zastępczego z rysunku 3.3 [101]

Wyniki symulacji i ich porównanie z wynikami pomiarów wskazują, że zaproponowany schemat zastępczy reaktora plazmowego z wyładowa-

niami barierowymi, przedstawiony na rysunku 3.3, poprawnie pod względem jakościowym, odwzorowuje przebiegi w układzie rzeczywistym [101].

### 3.1.3. Elektryczne i energetyczne parametry reaktorów z wyładowaniami barierowymi

Wyładowania barierowe powstają w uwarstwionym układzie dielektrycznym pod wpływem przyłożonego napięcia zmiennego AC, najczęściej sinusoidalnego lub kwasi-sinusoidalnego, którego podstawowe konstrukcje przedstawiono na rysunku 3.5. Mechanizmy i podstawowe parametry wyładowań elektrycznych w obecności bariery dielektrycznej (DBD) zostały omówione w rozdziale 2 (podrozdziały 2.8÷2.10). Poniżej omówione zostaną elektryczne właściwości wyładowań w ozonatorze, jako odbiorniku energii elektrycznej, oraz jego parametry energetyczne.

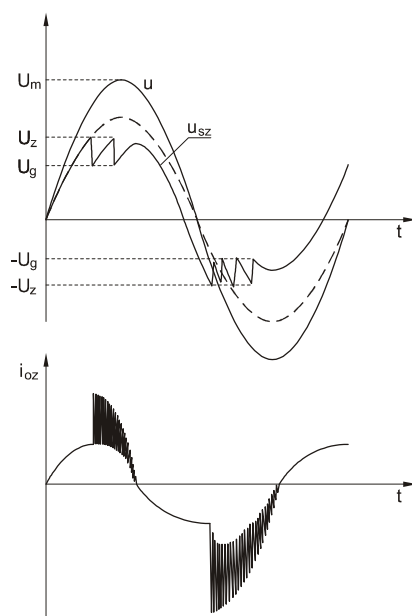


Rys. 3. 5. Schematy reaktorów z wyładowaniami barierowymi: a) ozonator, b) reaktor z dielektrykiem o strukturze porowatej, zwany upakowaniem dielektrycznym

Prześledźmy przebieg napięcia i prądu ozonatora podczas pierwszego okresu przyłożenia napięcia do jego elektrod (Rys. 3.6). Gdy wartość chwilowa napięcia zasilającego wzrasta, rośnie także napięcie na szczeliny wyładowczej, i z chwilą, gdy osiągnie ono wartość napięcia zapłonu wyładowań  $U_z$ , powstaje pewna liczba mikrowyładowań w przestrzeni

gazowej. Napięcie zapłonu wyładowań, mimo obecności dielektryka stałego, może być wyznaczone z krzywych Paschena, w zależności od iloczynu ciśnienia gazu  $p$  i odległości międzyelektrodowej  $d$  (Rys. 2.11, str. 58).

Ozonatory pracują zazwyczaj przy ciśnieniu atmosferycznym lub podwyższonym i mają wąskie szczeliny wyładowcze (od 0,5 do 5 mm) a gazem wejściowym jest powietrze, czasami wzbogacane tlenem, lub ostatnio, coraz częściej, czysty tlen. Dla takich warunków napięcie zapłonu wyładowań zawiera się w granicach od 3 do 15 kV.



Rys. 3. 6. Przebieg napięcia  $u_{sz}$  na szczelinie wyładowczej i prądu  $i_{oz}$  ozonatora podczas pierwszego okresu przyłożenia do elektrod napięcia sinusoidalnego:  $U_m$  – amplituda napięcia zasilającego,  $U_g$  – napięcie gaśnięcia wyładowań,  $U_z$  – napięcie zapłonu wyładowań

Z chwilą, gdy ładunek na powierzchni dielektryka stanie się wystarczająco duży, aby unieruchomić wyładowanie, napięcie chwilowe na szczelinie wyładowczej  $u_{sz}(t)$  maleje do wartości napięcia gaśnięcia  $U_g$ .

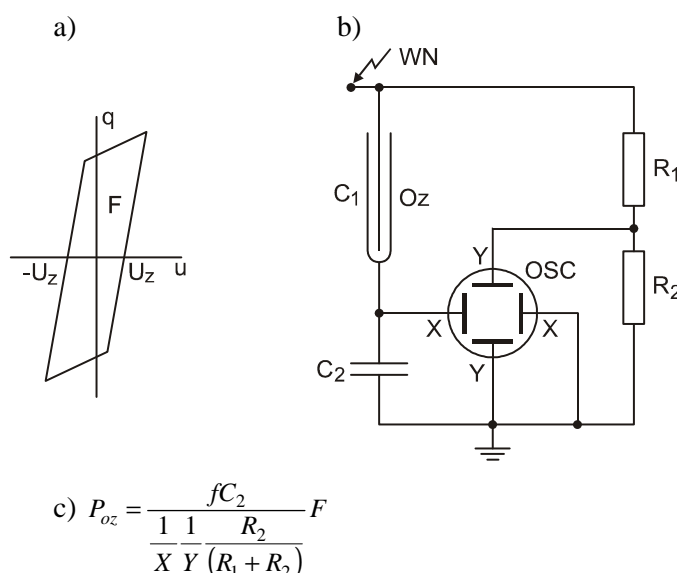
Na krzywej prądu  $i(t)$  pojawiają się krótkie impulsy odpowiadające poszczególnym mikrowyładowaniom (Rys.3.6) i trwają do chwili, gdy napięcie zasilające osiąga swoje pierwsze maksimum  $U_m$ . Wówczas, napięcie ze źródła nie jest już w stanie wyrównać spadku potencjału na szczelinie podczas poprzedniego wyładowania i prąd zanika. Dielektryk naładowany jest w przybliżeniu do maksymalnej wartości napięcia źródła, a na szczelinie panuje napięcie gaśnięcia  $U_g$ . Prąd wyprzedza napięcie praktycznie o  $\pi/2$ , a zatem prąd zmienia kierunek, gdy napięcie osiąga wartość maksymalną. Prąd, po zmianie kierunku, neutralizuje ładunek zgromadzony na powierzchni dielektryka, podczas gdy napięcie na szczelinie wyładowczej dąży do osiągnięcia ujemnej wartości napięcia zapłonu wyładowań  $u_{sz} = -U_z$ . Następuje kolejna faza mikrowyładowań.

Zarówno napięcie zapłonu, jak i impulsy prądowe, nakładające się na prąd przesunięcia w dielektryku, wykazują asymetrię w zależności od biegunowości napięcia zasilającego i są liczniejsze oraz mają mniejszą amplitudę, gdy elektrony wędrują z dielektryka do elektrody metalowej. Zjawisko to można wyjaśnić obniżaniem się wartości napięcia zapłonu wyładowań, gdy elektrony przemieszczają się w szczelinie w kierunku od dielektryka do elektrody metalowej [65, 82, 101]. Średnia liczba wyładowań  $N$ , przypadająca na jeden okres zmian napięcia, zależy od wartości jego amplitudy  $U_m$  i częstotliwości  $f$  oraz napięć zapłonu  $U_z$ , i gaśnięcia  $U_g$ , według [101]:

$$N = 4f \left( 1 + \frac{U_m - U_z}{U_z - U_g} \right). \quad (3.1)$$

Ponieważ energia pojedynczego mikrowyładowania jest stała, dla danej odległości międzyelektrodowej  $d$  i gęstości gazu  $\rho$ , to moc czynna, dostarczana do przestrzeni wyładowań, jest proporcjonalna do częstotliwości  $f$  zmian napięcia zasilającego  $u(t)$ . Dla gazu przepływającego przez szczelinę wyładowczą całkowita liczba wyładowań w danej objętości jest proporcjonalna do częstotliwości  $f$  i czasu przebywania gazu w szczelinie

wyładowczej, oraz odwrotnie proporcjonalna do natężenia przepływu gazu. Określenie sprawności procesu syntezy ozonu w wyładowaniu barierowym, wymaga wyznaczenia wartości energii elektrycznej dostarczonej do przestrzeni wyładowań. Natura mikrowyładowań, objawiająca się nanosekundowymi impulsami prądu przewodzenia nakładającymi się na znacznie wolniejszy prąd przesunięcia, utrudnia wyznaczenie energii metodą całkowania iloczynu chwilowych wartości prądu i napięcia. Wymaga to bowiem, już przy częstotliwości sieciowej, próbkowania przebiegów prądu i napięcia w co najmniej  $10^5$  punktach na jeden okres napięcia zasilającego.



Rys. 3.7. Figura Lissajous  $q = f(u)$  (a), b) układ do jej wyznaczenia, c) zależność na moc czynną wyładowań, w której:  $F$  – pole powierzchni ograniczone krzywą w działkach,  $X, Y$  – nastawy na oscyloskopie w V/dz,  $f$  – częstotliwość napięcia zasilającego, Hz,  $C_2$  – pojemność kondensatora włączonego w szereg z ozonotorem,  $F, R_1, R_2$  – rezystancje dzielnika napięcia,  $\Omega$

Najczęściej stosowaną metodą wyznaczenia mocy jest korzystanie z figury Lissajous – zależności ładunku  $q(t)$  od napięcia  $u(t)$  (Rys. 3.7). Powierzchnia figury  $q = f(u)$  uzyskana oscylograficznie w układzie z ry-



sunku 3. 7, jest miarą energii rozpraszanej w jednym cyklu zmian napięcia zasilającego w przestrzeni gazowej reaktora z wyładowaniami barierowymi.

Analitycznie moc czynną wyładowań barierowych można wyznaczyć analizując stany napięciowe dielektrycznego układu uwarstwionego przed i po wyładowaniu w przestrzeni gazowej [108]. Energia  $E$ , układu dielektrycznego uwarstwionego przed wyładowaniem, jest równa sumie energii w szczelinie wyładowczej o pojemności  $C_{sz}$  i w warstwie dielektryka  $C_d$  i wynosi:

$$E = E_{sz} + E_d = \frac{1}{2} [C_{sz} U_z^2 + C_d (U_m - U_z)^2]. \quad (3.2)$$

Po wyładowaniu, w wyniku zmiany napięcia na szczelinie powietrznej o  $\Delta U = U_z - U_g$ , energia układu maleje i wynosi:

$$E' = \frac{1}{2} [C_{sz} (U_z - \Delta U)^2 + C_d (U_m - U_z + \Delta U)^2]. \quad (3.3)$$

Ubytek energii podczas jednego mikrowyładowania jest zatem równy:

$$\Delta E = E - E' = \frac{1}{2} [(C_{sz} + C_d)(U_z^2 - U_g^2) - C_d U_m (U_z - U_g)]. \quad (3.4)$$

Mnożąc ubytek energii  $\Delta E$ , w układzie podczas pojedynczego wyładowania, przez średnią liczbę wyładowań  $N$  przypadającą na okres zmian napięcia zasilającego, wyznaczoną z zależności (3.1), po wykonaniu elementarnych działań otrzymujemy zależność na moc czynną wyładowań barierowych:

$$P = N \cdot \Delta E = 2f \left( U_m \frac{C_d}{C_d + C_{sz}} - U_g \right) (C_{sz} + C_d) (U_z + U_g). \quad (3.5)$$

Wprowadzając oznaczenie stosunku napięcia gaśnięcia do napięcia zapłonu wyładowań przez  $k = U_g/U_z$ , zależność (3.5) przyjmuje postać:

$$P = 2f C_d U_z (1+k) \left( U_m - \frac{C_{sz} + C_d}{C_d} U_g \right),$$

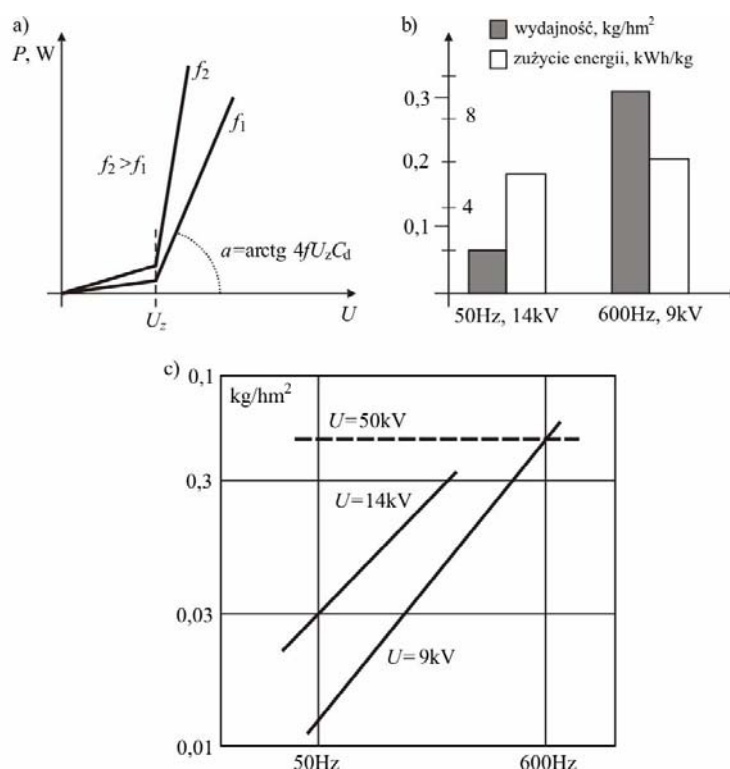
która, przy przyjmowanym często założeniu  $k = 1$  ( $U_g = U_z$ ), ostatecznie wyraża się zależnością, zwaną formułą Manley'a [68]:

$$P = 4f C_d U_z \left( U_m - \frac{C_{sz}}{C_w} U_z \right), \quad C_w = \frac{C_d C_{sz}}{C_d + C_{sz}}. \quad (3.6)$$

Zależność (3.6) pozwala wyznaczyć ważną przy projektowaniu ozonatorów gęstość powierzchniową mocy czynnej  $p_{el}$  ( $W/m^2$ ), jako stosunek mocy czynnej  $P$  do aktywnej powierzchni wyładowczej elektrod  $S_{el}$ :  $p_{el} = P/S_{el}$ , od której zależy wydajność ozonatora. Zależność ta pokazuje, jak wpływają parametry układu zasilania w energię elektryczną na jej wartość. Wydajność syntezy ozonu, której miarą jest moc czynna elementu wyładowczego (3.6), zależy liniowo od napięcia i częstotliwości (Rys. 3.8). Zależność wydajności od napięcia wykorzystuje się w ozonatorach do regulacji ilości wytwarzanego ozonu, jednak podwyższanie napięcia zasilającego, w celu zwiększenia wydajności, jest ograniczone wytrzymałością na przebicie dielektryka stałego i zwykle nie przekracza 50 kV. Skutecznym sposobem poprawy wydajności ozonatora jest zwiększenie częstotliwości napięcia zasilającego. Jednakże, tu także występują ograniczenia, wynikające ze wzrostu temperatury gazu w przestrzeni wyładowczej, co pogarsza przebieg procesu syntezy i zmusza do stosowania specjalnych systemów chłodzenia elektrod. W praktyce przemysłowej stosowane są częstotliwości podwyższone (150, 600, 750 Hz), przy których chłodzona wodą jest elektroda uziemiona. Wyższe częstotliwości zasilania wymagają chłodzenia obu elektrod oraz stosowania innych niż woda mediów chłodzących [64, 82, 91].

Stosowanie podwyższonej częstotliwości zasilania pozwala uzyskiwać wymaganą wydajność przy niższych wartościach napięcia, co sprzyja większej trwałości elementów wyładowczych. Wpływ napięcia i częstotliwości na moc, zużycie energii i wydajność ozonatora przedstawiono na rysunku 3.8. Jak wynika z zależności (3.6) i z rysunku 3.8a, moc jest liniową funkcją częstotliwości, natomiast wydajność (rys. 3.8 b i c) zmie-

nia się z częstotliwością wolniej niż proporcjonalnie. W praktyce, podwojenie wydajności reaktora ozonu wymaga kilkunastokrotnego wzrostu częstotliwości i wówczas należy się liczyć z 15÷20 % wzrostem strat w postaci ciepła w elemencie wyładowczym, które musi być odprowadzone przez układ chłodzenia.



Rys. 3.8. Wpływ amplitudy i częstotliwości napięcia zasilającego na moc czynną (a), jednostkowe zużycie energii (b) i wydajność ozonatora (c)

W wytwarzaniu ozonu na skalę przemysłową, ważnym parametrem jest wydajność energetyczna procesu, mierzona ilością energii pobieranej z sieci przez układ zasilania dla wytworzenia 1kg ozonu (w kWh/kg), bądź ilości ozonu w uzyskaną z 1 kWh dostarczonej energii (kg/kWh).

Z przeprowadzonej w rozdziale 4.5 (str. 143) analizy mocy i sprawności wybranych układów zasilania ozonatorów wynika, że straty energii w elementach układu zasilania (transformatorze, przetwornicy częstotli-

wości, dławikach, układach regulacji napięcia) są porównywalne z energią zużywaną przez elementy wyładowcze na wytworzenie ozonu, stąd tak ważnym zagadnieniem jest dobór i optymalizacja elektrycznego układu zasilania, zwłaszcza w przemysłowych reaktorach plazmy wyładowań barierowych.

Przy analizowaniu parametrów energetycznych procesu syntezy ozonu nie można pominąć ważnego parametru syntezy, jakim jest koncentracja ozonu w  $\text{g/m}^3$ . Jest ona dla danego urządzenia parametrem warunkującym sprawność procesu syntezy. Maksymalna sprawność generacji w  $\text{g O}_3/\text{kWh}$  dla danego urządzenia występuje przy niemal zerowej koncentracji i maleje w miarę jej wzrostu, zatem przy projektowaniu ozonatora należy liczyć się z kompromisem pomiędzy sprawnością generacji ozonu i jego koncentracją, wymaganą przez dany proces plazmowy. O sprawności reaktora plazmowego z wyładowaniami barierowymi decyduje nie tylko sprawność samych elementów wyładowczych i elementów układu zasilania, ale także straty w innych elementach układu, do których zaliczamy systemy przygotowania i dostarczania gazu, chłodzenia, regulacji i zabezpieczeń. Czynniki, od których zależy sprawność energetyczna procesu wytwarzania plazmy w wyładowaniach barierowych można podzielić na:

- geometryczne parametry elementów wyładowczych – kształt, wymiary i jakość powierzchni elektrod, rodzaj i grubość dielektryka, szerokość szczeliny wyładowczej;
- fizyczne i chemiczne parametry gazu wejściowego – rodzaj, skład, obecność zanieczyszczeń, temperatura, wilgotność, prędkość;
- elektryczne parametry układu zasilania – wartość, częstotliwość i kształt napięcia zasilającego, impedancja wewnętrzna źródła, współczynnik mocy.

W każdej z wymienionych grup czynników istnieją potencjalne możliwości doskonalenia procesu generacji nietermicznej plazmy w wyładowaniach barierowych. Ostatecznie jednak to układ zasilania w energię elek-

tryczną decyduje o całkowitej sprawności procesu generacji nietermicznej plazmy za pomocą wyładowań barierowych. Transformatorowe układy zasilania reaktorów z wyładowaniami barierowymi, których idea została opracowana przy współudziale autorki omówiono w rozdziale 4.3 [3, 94, 154, 173], zaś w rozdziale 6.1 przedstawiono przykład zastosowania wyładowań barierowych w procesach sterylizacji i dezynfekcji. Podano także wyniki badań nad wykorzystaniem plazmy wyładowań barierowych do obróbki gleby.

### **3.2. Reaktory z wyładowaniami łukowymi**

Reaktory plazmowe z łukiem elektrycznym, wykorzystywane są w technologiach przemysłowych od wielu lat. Ich główne zastosowania to spawanie, topienie, napyłanie, obróbka powierzchniowa materiałów, zwłaszcza trudnoobrabialnych, syntezy chemiczne. W ostatnim okresie wyładowania łukowe wykorzystuje się także do syntezy nowych materiałów, w tym nano- i bio- materiałów o specjalnych właściwościach wykorzystywanych w mikroelektronice, biotechnologiach, medycynie i ochronie środowiska [109÷118].

Szybki rozwój technik generacji plazmy znacznie rozszerzył możliwości wykorzystania urządzeń plazmowych z łukiem elektrycznym. W wielu zastosowaniach źródłem plazmy jest łuk elektryczny stabilizowany ściankami reaktora i przepływającym gazem, wytwarzający strumień plazmy wypływający z dużą prędkością na zewnątrz reaktora plazmowego. Regulacja parametrów elektrycznych, cieplnych i gazodynamicznych strumienia plazmy, w takim reaktorze plazmowym, jest stosunkowo łatwa i może być prowadzona w szerokich granicach. Charakterystyczną cechą strumienia plazmy łuku stabilizowanego jest możliwość osiągnięcia bardzo dużych koncentracji energii i mocy sięgających  $40 \text{ kW/cm}^3$  w stosunkowo niewielkiej przestrzeni, dlatego nagrzewanie plazmowo-łukowe zaliczane jest do jednych z najbardziej obiecujących

metod nagrzewania elektrycznego [116, 117]. Reaktory z łukiem elektrycznym wytwarzają plazmę termiczną, której cząstki znajdują się w stanie równowagi termodynamicznej. Przy unieszkodliwianiu gazów przemysłowych (np. gazy wylotowe elektrowni lub elektrociepłowni), łuk elektryczny, jako źródło plazmy jest mało przydatny, bowiem nie jest w stanie skutecznie spenetrować przestrzeni wypełnionej zanieczyszczonym powietrzem w sposób umożliwiający usunięcie zawartych w nim zanieczyszczeń. Długość łuku swobodnego, jego położenie w przestrzeni, objętość oraz charakterystyki plazmy nim generowanej nieustannie zmieniają się w sposób losowy. Czyni to wyładowanie łukowe i plazmę nim wytworzoną medium słabo sterowalnym z punktu widzenia utrzymania wymaganych charakterystyk dla procesów prowadzonych z udziałem nietermicznej plazmy.

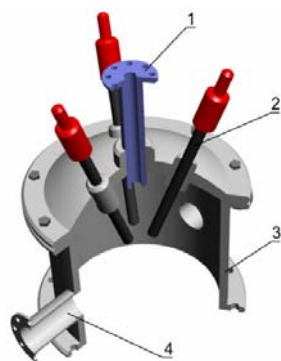
Ponieważ praca poświęcona jest właściwościom, sposobom generacji i zastosowaniom plazmy nietermicznej, omówiono tylko reaktory plazmy łukowej z łukiem ekspansyjnym, które, w pewnych warunkach, mogą generować „zimną” i nierównowagową plazmę.

### **3.2.1. Reaktory plazmowe z łukiem ekspansyjnym**

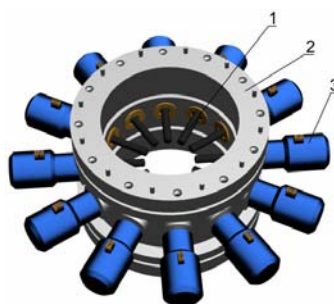
W procesach związanych z ochroną środowiska zastosowanie znajdują reaktory quasi-łukowe, generujące plazmę w fazie nierównowagowej i przy ciśnieniu atmosferycznym. Do takich należą reaktory plazmowe prądu przemiennego z łukiem ekspansyjnym. Przedstawiony na rysunku 3.9 reaktor plazmowy umożliwia prowadzenie badań nad przemysłowym wykorzystaniem plazmy, powstającej w trójfazowym wyładowaniu łukowym, do rozbijania węgłowodoru na sadzę i wodór [118]. Rozkład temperatury wewnątrz komory wyładowczej jest nierównomierny. W reaktorze o mocy 100 kW, w bezpośrednim sąsiedztwie wyładowania, odnotowuje się temperatury bliskie 7000 K, zaś na końcu komory wyładowczej temperatura osiąga około 1000 K [118]. Pionowe umieszczenie grafito-

wych elektrod oraz wymuszony nadmuch gazu plazmotwórczego, skierowany na wyładowanie od góry, zapobiegają osadzaniu się sadzy na elementach konstrukcyjnych reaktora. Nadmierne jej nagromadzenie w obszarze międzyelektrodowym mogłoby doprowadzić do zwarcia elektrod i w konsekwencji do zgaszenia wyładowania.

Dwunastoelektrodowy reaktor plazmowy, przedstawiony na rysunku 3.10, przeznaczony jest do syntezy nanorurek węglowych [120]. Proces technologiczny prowadzony jest w atmosferze helu o ciśnieniu 600 mmHg, a wyładowanie łukowe zachodzi przy napięciu (20÷45) V i prądzie (70÷100) A. W takich warunkach na stalowej płytce, umieszczonej we wnętrzu komory wyładowczej, można otrzymać warstwy nanorurek o średnicach (20÷40) nm. Zastosowanie dwunastu elektrod pozwala na bardziej równomierne wypełnienie komory wyładowczej plazmą, niż ma to miejsce w reaktorach o mniejszej liczbie.



Rys. 3.9. Reaktor trójelektrodowy [118]: 1 – dysza wlotowa gazu plazmotwórczego, 2 – elektroda grafitowa, 3 – komora wyładowcza, 4 – kanał wlotowy czynnika poddawanego obróbce plazmowej



Rys. 3.10. Schemat poglądowy konstrukcji dwunastoelektrodowego reaktora plazmowego [120]: 1 – elektrody grafitowe, 2 – komora wyładowcza, 3 – układ automatycznej regulacji długości elektrod

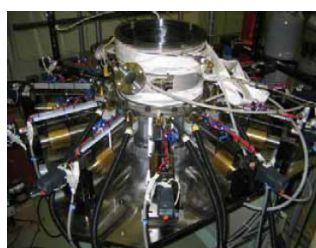
Zdjęcie wnętrza komory wyładowczej podczas pracy reaktora dwunastoelektrodowego przedstawia rysunek 3.11. Elektrody w reaktorze wykonane są z materiału, którego 99,9% objętości stanowi czysty grafit,

w postaci okrągłych prętów. Układy automatyki i ich rozmieszczenie wokół komory wyładowczej reaktora przedstawia zdjęcie z rysunku 3.12.

Innym rodzajem wyładowania z łukiem ekspansyjnym jest ślizgający się łuk elektryczny, znany w literaturze światowej pod nazwą „gliding arc”. Wyładowanie przemieszcza się wzdłuż elektrod wyładowczych ruchem ślizgowym, zmieniając istotnie swoje właściwości fizyczne – od charakterystycznych dla plazmy znajdującej się w stanie równowagi termodynamicznej do typowych dla plazmy nierównowagowej. Ostatnio, w literaturze polskojęzycznej spotyka się także określenie wyładowanie poślizgowe [121÷123]. Reaktorom plazmy z tym rodzajem wyładowań, jako źródłem nietermicznej plazmy przy ciśnieniu atmosferycznym, poświęcono kolejne rozdziały.



Rys. 3.11. Wnętrze komory wyładowczej dwunastoelektrodowego reaktora plazmowego [120]



Rys. 3.12. Zdjęcie układów automatyki dwunastoelektrodowego reaktora plazmowego [120]

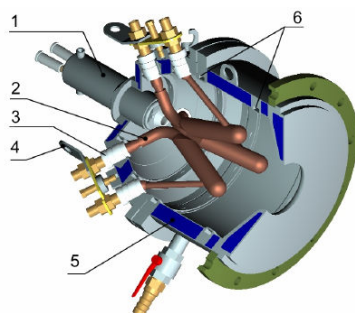
### 3.3. Reaktory ze ślizgającym się łukiem elektrycznym

Ślizgające się wyładowanie łukowe, jako źródło nietermicznej plazmy generowanej przy ciśnieniu atmosferycznym, zostało zaproponowane przez Albina Czernichowskiego i zespół z Laboratorium Fizyki Plazmy Uniwersytetu w Orleanie, we Francji w 1990 r. Jego główną cechą jest możliwość generacji nietermicznej plazmy bezpośrednio w zanieczyszczonym gazie, przy ciśnieniu atmosferycznym i w warunkach,

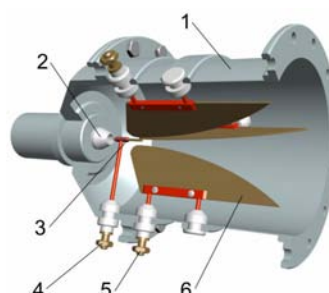


w jakich gazy wylotowe są emitowane do atmosfery, bez konieczności ich wstępnej obróbki [124÷129].

Plazmę ślizgającego się wyładowania łukowego, podobnie jak innych wyładowań łukowych, można generować przy napięciu stałym, przemiennym i impulsowym. Stosowane w przemyśle plazmotrony ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym są budowane jako dwu-, trzy- i wieloelektrodowe i często posiadają dodatkową elektrodę zapłonową. Przedstawiony na rysunku 3.13 reaktor plazmowy, wytwarza trójfazowe wyładowanie łukowe o mocy dochodzącej do 500 kW [129]. Zastosowane chłodzenie wodne elektrod i komory wyładowczej, umożliwia stosowanie w konstrukcji reaktora materiałów mało odpornych na wysokie temperatury.



Rys. 3.13. Trójelektrodowy reaktor plazmowy [129]: 1 – jednofazowy reaktor plazmowy, 2 – elektroda robocza, 3 – materiał izolujący, 4 – zacisk zasilania, 5 – obieg wody chłodzącej, 6 – kanały dostarczania gazu



Rys. 3.14. Reaktor plazmowy z dodatkową elektrodą zapłonową: 1 – komora wyładowcza, 2 – dysza wlotu gazu, 3, 4 – elektrody zapłonowe, 5, 6 – elektrody robocze

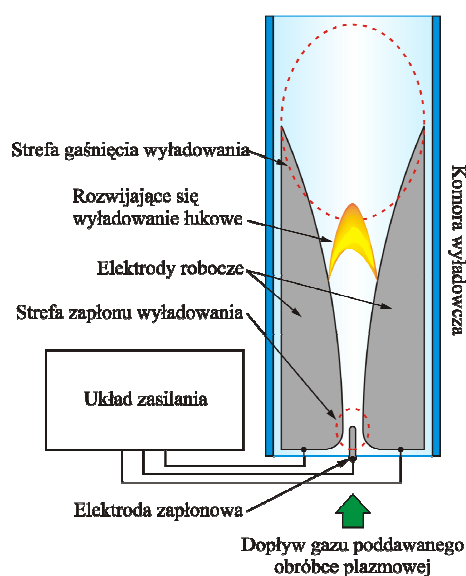
Dodatkowo szybki ruch punktów przyczepienia łuków wzdłuż elektrod, głównie pod wpływem sił gazodynamicznych i w pewnym stopniu także elektrodynamicznych, nie powoduje miejscowego nagrzewania elektrod. Elementem inicjującym wyładowanie, w reaktorze z rysunku 3.13, jest niewielkiej mocy reaktor plazmowy wytwarzający strumień

plazmy o koncentracji elektronów  $n_e=(10^{13} \div 10^{14})\text{cm}^{-3}$  skierowany do obszaru, w którym odległość pomiędzy elektrodami roboczymi jest najmniejsza. Koncentracja elektronów w strefie zapłonu wyładowania umożliwia pewny zapłon łuku elektrycznego na elektrodach roboczych. Taką samą funkcję spełnia elektroda zapłonowa w reaktorze trójelektrodowym przedstawionym na rysunku 3.14. Wytworzona nią niewielkiej mocy iskra elektryczna, jest wystarczająca do zjonizowania przestrzeni międzyelektrodowej, co ułatwia zapłon właściwego wyładowania między elektrodami roboczymi w każdym cyklu pracy reaktora.

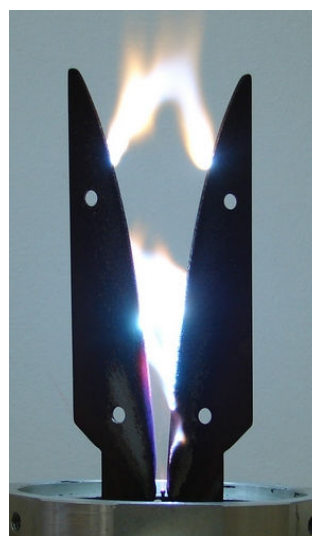
Aby zapewnić nierównowagowe i nietermiczne warunki generowanej plazmy, napięcie zasilające zwykle zawiera się w granicach od 1 kV do 2 kV, a prąd pary elektrod nie przekracza 10 A. Takie wartości napięcia i prądu nie są typowe dla wyładowania łukowego. Ponadto wymagane dla utrzymania wyładowania napięcie, między elektrodami roboczymi, ma niewystarczającą wartość do zapłonu wyładowań w każdym następnym cyklu pracy reaktora i dlatego do przestrzeni międzyelektrodowej, w tak zwanej strefie zapłonu, wprowadza się dodatkową elektrodę zapłonową. Najprostszy konstrukcyjnie jest dwuelektrodowy reaktor plazmowy ze ślizgającym się łukiem, którego geometrię przedstawiono na rysunku 3.15. Reaktor składa się z dwóch elektrod roboczych umieszczonych w komorze wyładowczej, przez którą przepływa z odpowiednią prędkością ( $>10$  m/s) zanieczyszczony gaz, poddawany obróbce plazmowej.

Na rys. 3.16 przedstawiono widok płonącego łuku w reaktorze dwuelektrodowym. Ze względu na małą odległość elektrod w strefie zapłonu, zwykle (1÷4) mm, warstwy przyelektrodowe stykają się ze sobą powodując wystąpienie łuku krótkiego, w którym praktycznie nie obserwuje się kolumny łukowej. Duże obciążenia cieplne w rejonie strefy zapłonu może powodować erozję elektrod. Można założyć, że w miejscu zapłonu, wyładowanie znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej. Pod wpływem sił gazodynamicznych wyładowanie przesuwa się wzdłuż elektrod i jest podtrzymywane przy znacznie niższym napięciu niż wymagane do

zapłonu. Towarzyszy temu kilkukrotny wzrost długości i objętości wyładowania, które ma cechy łuku długiego. Równocześnie następuje obniżenie temperatury ośrodka gazowego wewnątrz kolumny łukowej i przejście do fazy nierównowagowej.

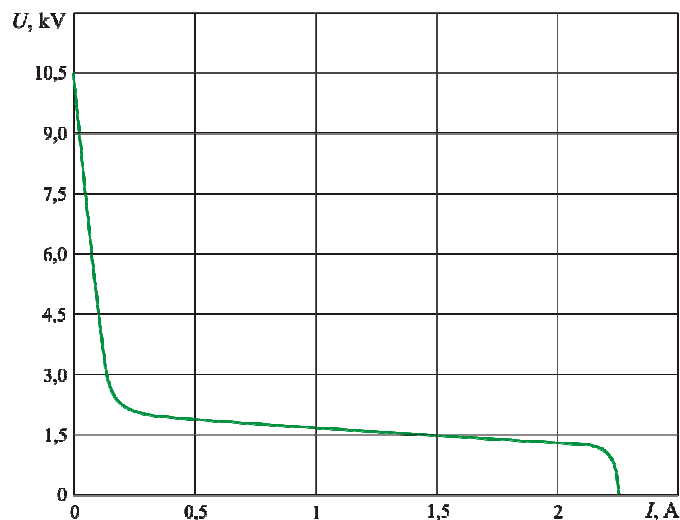


Rys. 3.15. Schemat ideowy reaktora dwuelektrodowego



Rys. 3.16. Ślizgające się wyładowanie łukowe

Zgaśnięcie wyładowania następuje z chwilą, gdy energia elektryczna dostarczana ze źródła zasilania nie jest w stanie zrównoważyć strat energetycznych wydłużającej się kolumny łukowej. Po zgaśnięciu wyładowania, następuje niemal natychmiastowa jego odbudowa w strefie zapłonu i cykl pracy reaktora powtarza się. Na czas trwania jednego cyklu ma wpływ wiele czynników, spośród których należy wymienić takie jak: wymiary i kształt elektrod, prędkość przepływu ośrodka gazowego przez komorę wyładowczą, temperatura panująca wewnątrz komory wyładowczej, skład chemiczny gazu, napięcie i natężenie prądu elektrod oraz częstotliwość napięcia zasilającego.



Rys. 3 17. Typowa charakterystyka statyczna napięciowo-prądowa ślizgającego się łuku

Z przedstawionej na rysunku 3.17 statycznej charakterystyki napięciowo-prądowej wynika, że napięcie zapłonu wyładowań (10,5 kV) ma wartość ponad sześciokrotnie większą od wymaganego do ich podtrzymania (1,5 kV) przy znamionowym prądzie elektrod wynoszącym 1,5 A. Zwiększenie liczby elektrod w reaktorze plazmowym pozwala na wytworzenie obszaru plazmy o większej objętości. Stosuje się więc układy wieloelektrodowe lub połączenia kilku reaktorów szeregowo dla przepływającego gazu.

Jak wynika z wcześniejszych badań [5, 39, 118, 122, 124], nawet do 80% energii wyładowania ślizgającego się łuku jest wyzwalana w fazie nierównowagowej, co czyni je szczególnie przydatnym w technologiach oczyszczania gazów, emitowanych zwykle w dużych ilościach i przy ciśnieniu atmosferycznym.

W rozdziale 3.3.1 przedstawiono charakterystyki statyczne i dynamiczne trójfazowych reaktorów plazmowych, wyznaczone eksperymentalnie dla różnych gazów roboczych oraz różnych parametrów układu

zasilania, zwracając szczególną uwagę na zjawiska związane z paleniem się łuku w układzie trójfazowym [129].

### **3.3.1. Charakterystyki reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym**

Charakterystyki reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem różnią się od tych, jakie prezentują reaktory z innymi rodzajami wyładowań elektrycznych. Rezystancja przestrzeni międzyelektrodowej, która zależy od stopnia jonizacji gazu, zmienia się istotnie podczas każdego cyklu pracy reaktora i jest największa przed zapłonem, gdy gaz nie jest zjonizowany. Po zapłonie gwałtownie maleje i następnie ponownie rośnie, wraz z rozwijającym się łukiem, aż do zgaśnięcia wyładowania w miejscu największego odstępu elektrod. Charakterystyki statyczne i dynamiczne reaktora plazmowego zależą od wielu czynników, z których najważniejsze to: geometria reaktora plazmowego, rodzaj gazu roboczego i parametry układu zasilania. Poprzez zmianę tych czynników można wpływać na parametry elektryczne i termiczne wyładowania w komorze wyładowczej reaktora plazmowego. Sterując mocą wyładowania, temperaturą generowanej plazmy, stopniem jonizacji gazu roboczego oraz jego składem chemicznym można kształtować parametry technologiczne prowadzonego procesu plazmowego.

Charakterystyki wyznaczono dla trójfazowego reaktora plazmowego z dodatkową elektrodą zapłonową, (Rys. 3.14), zasilanego z układu przekształtnikowego o regulowanej wartości napięcia i częstotliwości wyjściowej, poprzez transformatory podwyższające napięcie. Dane techniczne badanego układu zestawiono w tablicy 3.3. Charakterystyki trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową przedstawiono na rysunkach od 3.18 do 3.27. Pomiarów wykonano dla trzech gazów roboczych: argonu, azotu i powietrza przy przepływie gazu przez dyszę pla-

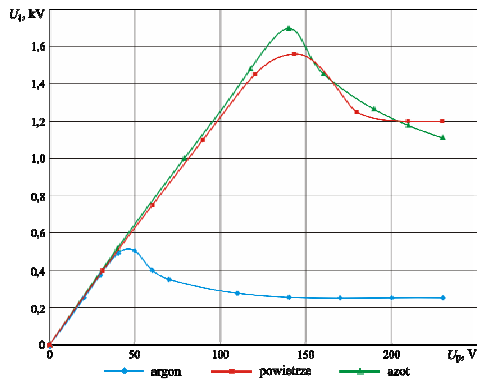
zmotronu wynoszącym  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  przy ciśnieniu normalnym. Elektroda zapłonowa zasilana była napięciem  $15 \text{ kV}$  o częstotliwości  $20 \text{ kHz}$ .

Tablica 3.3. Dane techniczne układu zasilania

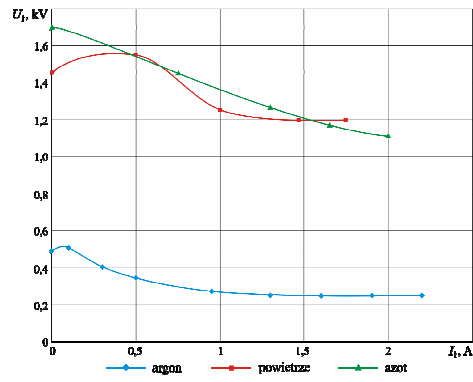
Transformatory	
Napięcie pierwotne	230 V
Prąd pierwotny	18 A
Napięcie wtórne	1,4 kV
Prąd wtórny	3 A
Przekształtnik tyrystorowy AC/DC/AC	
Napięcie pierwotne	230 V
Prąd pierwotny	15 A
Napięcie wyjściowe regulowane	0 – 200 V
Prąd wyjściowy regulowany	0 – 25 A
Częstotliwość wyjściowa regulowana	10 – 200 Hz
Układ zapłonowy	
Napięcie zasilania	230 V
Prąd zasilania	0,25 A
Napięcie wyjściowe	15 kV
Prąd wyjściowy	40 mA
Częstotliwość wyjściowa	20 kHz

Minimalna wartość napięcia, które podtrzyma wyładowanie łukowe między elektrodami roboczymi reaktora plazmowego, jest różna dla różnych gazów roboczych. Dla argonu (Rys. 3.18) wartość napięcia podtrzymania wyładowania wynosi  $250 \text{ V}$  i jest prawie pięć razy mniejsza niż dla powietrza ( $1200 \text{ V}$ ) i azotu ( $1100 \text{ V}$ ) [129].

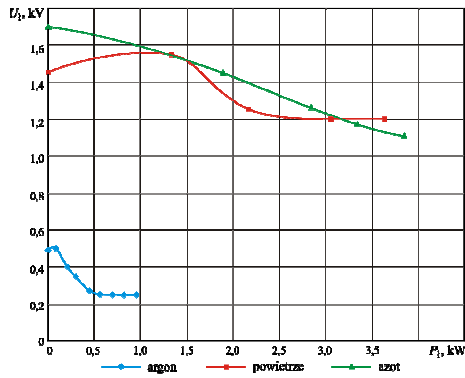
Jak wynika z charakterystyk statycznych, przedstawionych na rysunkach 3.19 do 3.22, moc ślizgającego się wyładowania łukowego i rezystancja przestrzeni międzyelektrodowej zmieniają się szerokich granicach wraz ze zmianami wartości prądu, napięcia, częstotliwości i rodzaju gazu roboczego, w którym występuje wyładowanie.



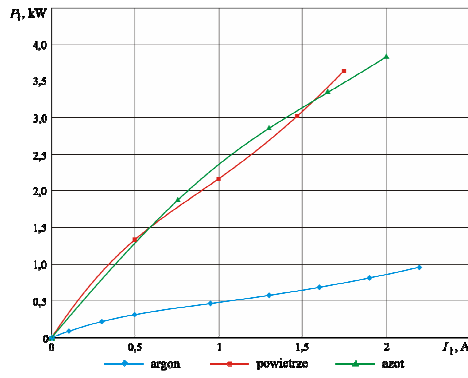
Rys. 3.18. Napięcie łuku  $U_i$  w funkcji napięcia zasilającego  $U_p$



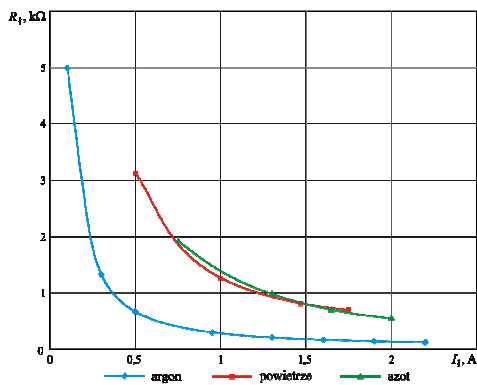
Rys. 3.19. Charakterystyki zmian napięcia łuku  $U_i$  w funkcji prądu łuku  $I_i$



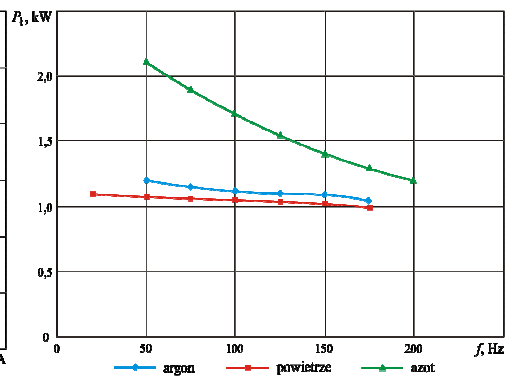
Rys. 3.20. Zmiana napięcia łuku  $U_i$  w funkcji mocy łuku  $P_i$



Rys. 3.21. Zależność mocy wyładowania  $P_i$  od wartości prądu łuku  $I_i$



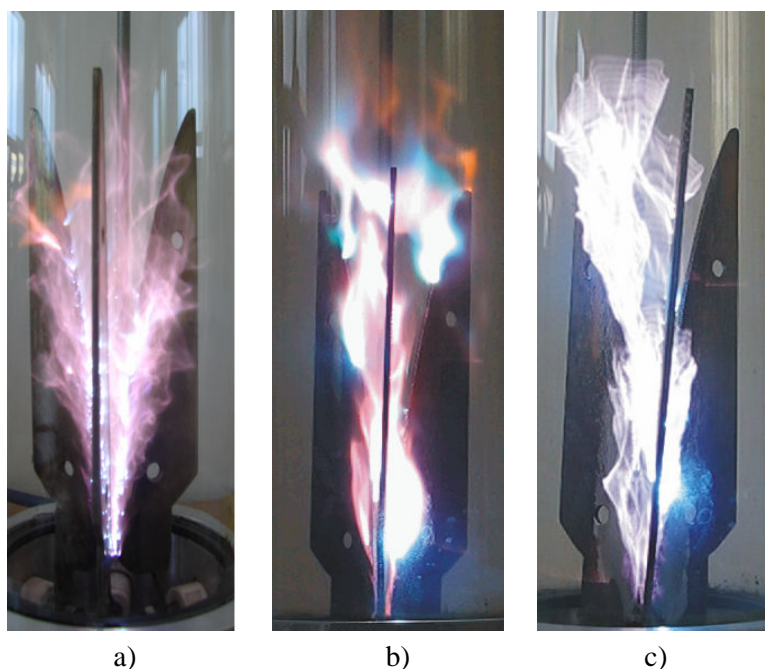
Rys. 3.22 Zmiany rezystancji przestrzeni międzyelektrodowych  $R_i$  reaktora plazmowego w funkcji prądu wyładowania  $I_i$



Rys. 3.23. Wpływ częstotliwości napięcia zasilającego  $f$  elektrody robocze reaktora plazmowego na moc wyładowania  $P_i$

Duży wpływ na charakterystyki dynamiczne ślizgającego się wyładowania łukowego ma impedancja obwodu zasilającego, a przy zasilaniu reaktora poprzez transformatory podwyższające napięcie (na ogół niezbędne w większości zasilaczy reaktorów łukowych), także materiał rdzenia, który może zasadniczo zmieniać przebieg wyładowania.

Na rysunku 3.24 przedstawiono zdjęcia ślizgającego się wyładowania łukowego w układzie trójelektrodowym, dla tych samych parametrów elektrycznych wyładowania (2,2 A i 250 V) oraz rodzaju gazu roboczego (argon) i jego przepływu (1 m<sup>3</sup>/h). Charakter wyładowania ulega istotnym zmianom dla różnych materiałów rdzenia (blacha transformatorowa, taśma amorficzna).

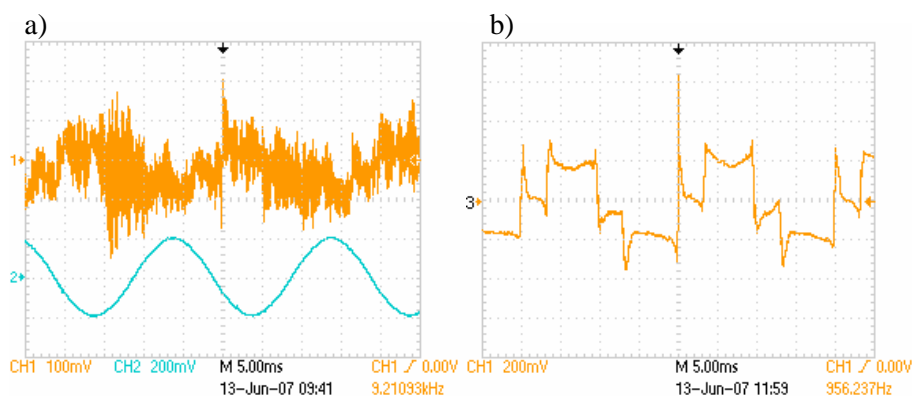


Rys. 3.24. Ślizgające się wyładowanie łukowe w reaktorze trójelektrodowym przy zasilaniu z: a) transformatorów o rdzeniach z blachy transformatorowej ET-3, b) transformatorów z rdzeniami amorficznymi (METGLAS), c) z układu przekształtnikowego (gaz roboczy: argon, napięcie wyładowania  $U_1 = 250$  V, prąd  $I_1 = 2,2$  A, przepływ gazu 1 m<sup>3</sup>/h)



Powodem tego zjawiska jest nieliniowość rezystancji wyładowania łukowego i charakterystyki magnesowania rdzenia oraz różne pasma przenoszenia sygnałów napięcia, odkształconych wyższymi harmonicznymi, przez tradycyjny rdzeń z blachy transformatorowej oraz rdzeń amorficzny.

Przy zasilaniu reaktora plazmowego z układu przekształtnikowego, dodatkowo w przebiegach napięć pojawiają się wyższe harmoniczne wynikające z częstotliwości ich próbkowania, co, jak widać z rysunku 3.24c, wyraźnie wpływa na przebieg wyładowania. Wpływ częstotliwości próbkowania i układu zapłonowego widoczny jest także na oscylogramach prądów, napięć i mocy przedstawionych na rysunku 3.25.

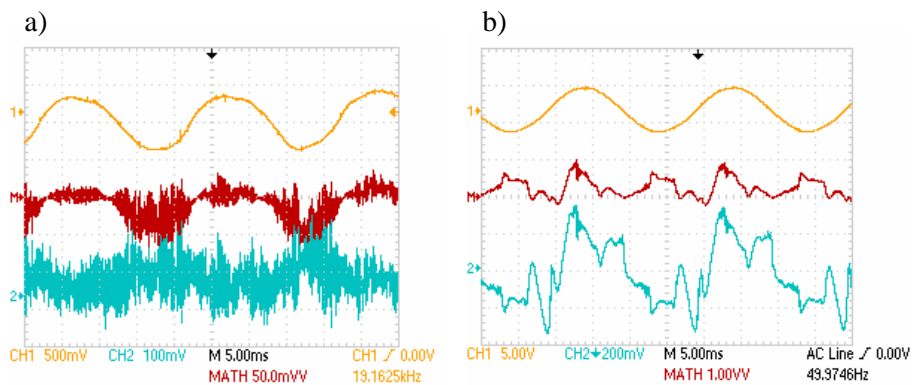


Rys. 3.25. Oscylogramy prądu i napięcia wyładowania w reaktorze plazmowym 1 – napięcie fazowe, 2 – prąd fazowy, 3 – napięcie przewodowe

Zastosowane w konstrukcji transformatorów zasilających rdzenie amorficzne przenosiły częstotliwość 20 kHz, z jaką pracował elektroniczny układ zapłonowy oraz inne wyższe harmoniczne generowane przez łuk elektryczny. Harmoniczne te występowały w napięciach fazowych elektrod, natomiast prąd elektrod miał kształt sinusoidalny (Rys. 3.25a). Wyższe harmoniczne generowane przez układ zapłonowy nie występują w napięciach międzyelektrodowych (Rys. 3.25b). Stosując transformatory z rdzeniami z blachy elektrotechnicznej, w układzie zasilania reaktora

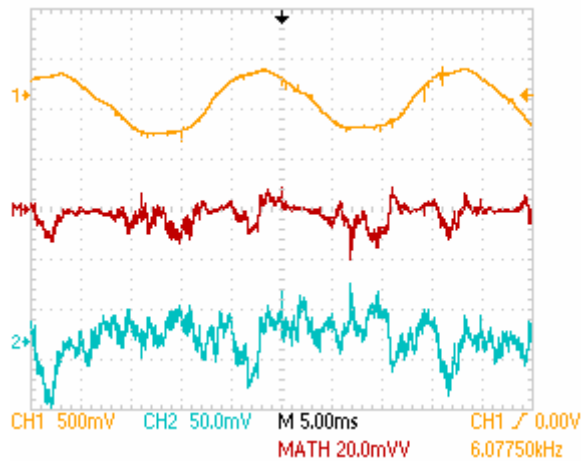
łukowego obserwuje się mniejszy udział wyższych harmoniczných w napięciach fazowych zasilających elektrody.

Dla porównania, na rysunku 3.26, przedstawiono oscylogramy napięć fazowych, prądu oraz mocy wyładowania dla obu rodzajów materiału rdzenia (amorficzny, blacha elektrotechniczna) transformatorów stosowanych w układzie zasilania. Zmniejszenie zawartości wyższych harmoniczných w układzie z rdzeniami amorficznymi jest możliwe przez zastosowanie układu zapłonowego pracującego przy częstotliwości technicznej 50 Hz. Przebieg napięcia fazowego w takim układzie oraz prądu i mocy wyładowania przedstawia rysunek 3.27.

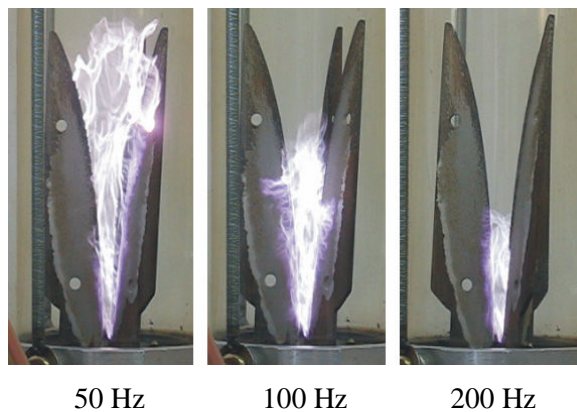


Rys. 3.26. Oscylogramy 1 – prądu fazowego, 2 – napięcia fazowego, M – mocy wyładowania przy zasilaniu reaktora plazmowego z transformatorów o rdzeniach: a) amorficznych, b) z blachy transformatorowej

Mimo zaniku w napięciu częstotliwości 20 kHz nadal obserwuje się znaczny udział wyższych harmoniczných innych rzędów. Harmoniczne te generowane są przez wyładowanie elektryczne. W transformatorach o rdzeniach z blachy transformatorowej wyższe harmoniczne tłumione są przez obwód magnetyczny układu zasilania i nie występują w napięciach fazowych.



Rys. 3.27. Oscylogramy 1 – prądu fazowego, 2 – napięcia fazowego, M – mocy wyładowania przy zasilaniu reaktora plazmowego przez transformatory z rdzeniami amorficznymi i z układem zapłonowym o częstotliwości 50 Hz



Rys. 3.28. Wpływ częstotliwości napięcia zasilającego elektrody robocze na charakter wyładowania. (napięcie wyładowania  $U_1 = 250$  V, prąd łuku  $I_1 = 2,2$  A, przepływ gazu  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ , gaz roboczy argon)

Generalnie, częstotliwość napięcia zasilającego elektrody robocze ma niewielki wpływ na wartość mocy wyładowania, jednakże największy dla wyładowania w azocie (Rys. 3.23). Zmiana częstotliwości napięcia zasilającego elektrody robocze reaktora plazmowego ma natomiast wpływ na

sposób, w jaki rozwija się wyładowanie. Na rysunku 3.28 przedstawiono wyładowanie zachodzące przy 50 Hz, 100 Hz i 200 Hz w azocie.

Przy częstotliwości sieciowej wyładowanie rozwija się na całej długości elektrod roboczych. Wraz ze wzrostem częstotliwości zmniejsza się przestrzeń, jaką wypełnia wyładowanie i przy 200 Hz ogranicza się ona praktycznie do niewielkiego obszaru wokół elektrody zapłonowej. W badanym reaktorze, zasilanym z układu przekształtnikowego poprzez transformatory podwyższające napięcie, ze wzrostem częstotliwości napięcia zasilającego następuje zmniejszenie mocy wyładowania oraz ograniczenie objętości generowanej plazmy [129].

### **3.3.2. Cykl pracy reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym**

Zapłon wyładowania na elektrodach roboczych reaktora plazmowego inicjowany jest przeskokiem iskry elektrycznej pomiędzy elektrodą zapłonową a jedną z trzech elektrod roboczych. Pojedynczy kanał iskry elektrycznej jest rozdmuchiwany gazem napływającym z dyszy do komory wyładowczej reaktora. W efekcie przebiegu iskrowego składa się z drzewa rozgałęziających się kanałów, co ułatwia wstępną jonizację obszaru w miejscu zapłonu głównego wyładowania, między elektrodami roboczymi. Po przebiegu przerwy międzyelektrodowej jej rezystancja staje się bardzo mała i napięcie w obszarze wyładowania spada poniżej wartości napięcia gaśnięcia, co pociąga za sobą przerwanie wyładowania iskrowego. Następnie, napięcie międzyelektrodowe ponownie wzrasta i cykl pracy powtarza się. W trójfazowym reaktorze plazmowym, z dodatkową elektrodą zapłonową, odległość przerw międzyelektrodowych w strefie zapłonu wyładowania jest mniejsza niż 1 cm, i rozwój wyładowania iskrowego na elektrodzie zapłonowej może być opisany mechanizmem opracowanym przez Townsenda [85]. Dla większych przerw międzyelektrodowych, wyładowanie iskrowe rozwija się w nierównomiernym polu

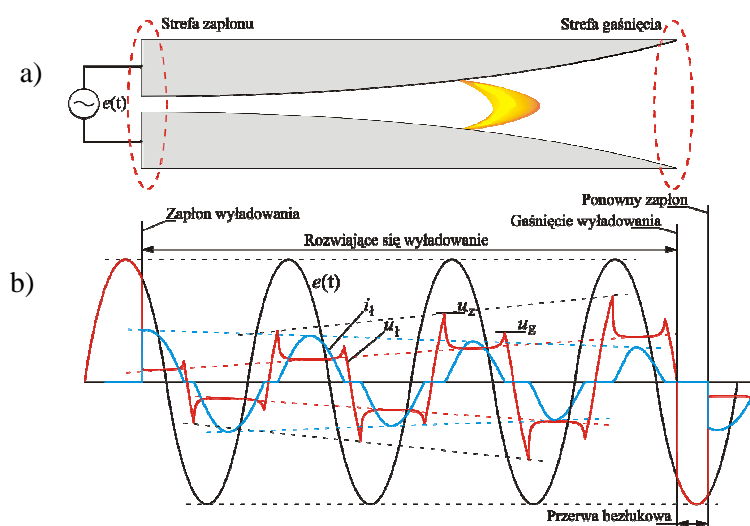
elektrycznym i przy mniejszych natężeniach tego pola, niż wynikłoby to z obliczeń przeprowadzonych przez Townsenda.

Cykl pracy reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem zostanie prześlędzony na przykładzie reaktora dwuelektrodowego (Rys. 3.29). Z chwilą zamknięcia się kanału iskry elektrycznej między elektrodami roboczymi, wzrasta moc dostarczana do wyładowania. Przy wzroście mocy źródła kanały iskrowe rozszerzają się w szerokie pasma i wyładowanie przechodzi w tzw. zagęszczone wyładowanie iskrowe. Przy dalszym wzroście mocy źródła wyładowanie przekształca się w łuk elektryczny. W łuku elektrycznym emisja elektronów z elektrod ma charakter termiczny, dlatego charakterystyczne dla łuku jest to, że im większy jest prąd wyładowania, tym mniejsze napięcie jest potrzebne do podtrzymania jego płonienia. Przy stosunkowo dużym wzroście prądu występuje niewielkie zmniejszenie napięcia, i w efekcie wzrasta moc wydzielana w łuku. Wzrost mocy łuku pociąga za sobą wzrost temperatury katody a więc i wzrost jej emisji.

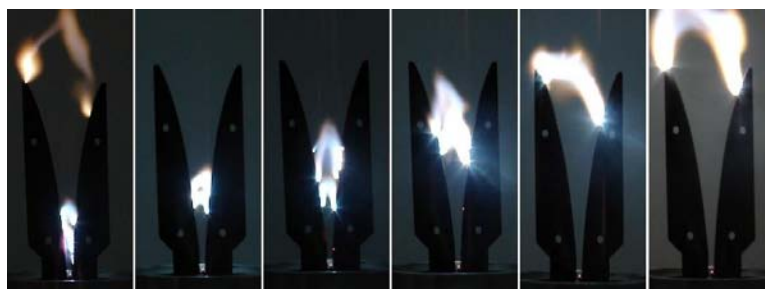
Temperatura kolumny łuku elektrycznego zawiera się w granicach (4000 ÷ 7000) K i rośnie wraz z ciśnieniem gazu. W reaktorach plazmowych, ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, dąży się do osiągnięcia łuku długiego o stosunkowo szerokiej kolumnie. Łuk ten musi być na tyle zimny, by nie topić materiału elektrod i elementów konstrukcyjnych reaktora. Równocześnie palący się w reaktorach łuk musi zapewniać odpowiednie parametry generowanej nim plazmy, aby poprawnie prowadzić reakcje plazmo-chemiczne. Takie wyładowanie łukowe można otrzymać przy stosunkowo wysokim napięciu i niewielkich wartościach prądu. Wytrzymałość przerwy międzyelektrodowej zależy od parametrów termodynamicznych gazu, w jakim zachodzi wyładowanie łukowe, a w szczególności od jego składu chemicznego, ciśnienia, temperatury, a w mniejszym stopniu, od jego prędkości w komorze wyładowczej.

Ślizgający się łuk elektryczny, jako odbiornik energii elektrycznej, wraz z układem zasilania tworzą obwód o parametrach nieliniowych

i niestacjonarnych. Na rysunku 3.29 przedstawiono teoretyczne przebiegi napięcia i prądu podczas cyklu pracy dwuelektrodowego reaktora plazmowego.



Rys. 3.29. Chwilowe przebiegi napięć i prądów dwuelektrodowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym; a) szkic elektrod, b) przebiegi chwilowe:  $e(t)$  – napięcie źródła zasilania,  $u_1$  – napięcie łuku,  $i_1$  – prąd łuku,  $u_z$  – napięcie zapłonu wyładowania,  $u_g$  – napięcie gaśnięcia wyładowania

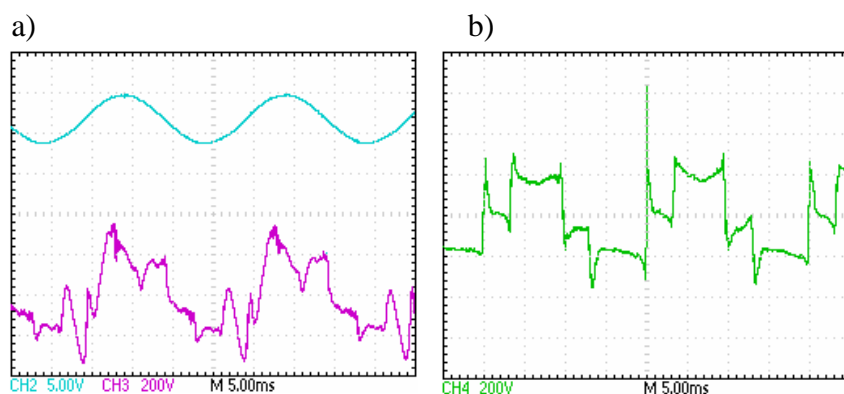


Rys. 3.30. Rozwój wyładowania łukowego przy jego naturalnym unoszeniu się w trakcie cyklu pracy dwuelektrodowego reaktora plazmowego [129]

Odpowiadający przedstawionym przebiegom chwilowym rozwój ślizgającego się łuku w powietrzu (bez nadmuchu gazu roboczego) pod-

czas cyklu pracy dwuelektrodowego reaktora plazmowego, od chwili zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych do chwili jego zgaszenia, przedstawiono na rysunku 3.30.

Z charakterystyk uzyskanych w trójelektrodowym reaktorze plazmowym, zasilanym z sinusoidalnego źródła napięcia, przedstawionych na rysunku 3.31, wynika, że prąd łuku jest praktycznie sinusoidalny natomiast silnemu odkształceniu ulega napięcie.

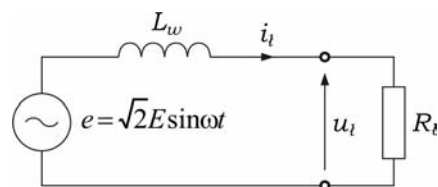


Rys. 3.31. Przebiegi prądu i napięcia pracującego reaktora plazmowego: a) przebiegi prądu i napięcia fazowego, b) napięcie międzyfazowe

Czas trwania jednego cyklu pracy reaktora, od zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych do jego zgaśnięcia na krańcach elektrod, zależy od ich wymiarów i kształtu, prędkości przepływu gazu, jego rodzaju oraz temperatury i może wynosić od kilku do kilkunastu okresów napięcia zasilającego przy częstotliwości sieciowej 50 Hz.

Przyjmując jednofazowy schemat zastępczy układu para elektrod reaktora łukowego – nieidealne sinusoidalne źródło zasilania o indukcyjności wewnętrznej  $L_w$ , można przeprowadzić uproszczone rozważania energetyczne, niezbędne do projektowania i budowy układów zasilania urządzeń wyładowczych ze ślizgającym się łukiem elektrycznym. Przed zapłonem wyładowań prąd nie płynie, napięcie na elektrodach jest równe napięciu źródła, a rezystancja przestrzeni międzyelektrodowej jest nie-

skończenie duża. Dla analizy mocy istotny jest stan po zapłonie, który nastąpi, gdy wartość chwilowa napięcia źródła przekroczy napięcie zapłonu wyładowań. Indukcyjność wewnętrzna źródła  $L_w$  jest stała, natomiast rezystancja łuku  $r_l(t)$  zmienia wartość w czasie półokresu napięcia zasilającego, a przebiegi prądu i napięcia na wyładowaniu odbiegają od sinusoidy. Aby ograniczyć prąd zwarcia, reaktancja źródła ma zwykle w układach zasilania urządzeń wyładowczych znaczną wartość i prąd elektrod jest znacznie mniej odkształcony niż napięcie (Rys. 3.31). Jeżeli przyjmiemy do rozważań pierwsze harmoniczne prądu i napięcia, to nieliniową rezystancję wyładowania łukowego możemy zastąpić wartością stałą  $R_l$ , a schemat zastępczy układu może być odwzorowany jak na rysunku 3.32.



Rys. 3.32. Schemat zastępczy układu reaktor łukowy – źródło do uproszczonych rozważań energetycznych:  $R_l$  – rezystancja łuku,  $L_w$  – indukcyjność źródła

Jeżeli prąd łuku jest ograniczany dławikami, jak to często ma w praktyce miejsce, to indukcyjność  $L_w$  na schemacie zastępczym jest sumą indukcyjności wewnętrznej układu zasilania i indukcyjności dławików. Rezystancja wyładowania w przepływającym gazie ma wartość kilkuset omów i jest miarą mocy czynnej  $P$ . Przerwy bezprądowe, występujące między kolejnymi cyklami, trwają nie dłużej niż  $1/4$  okresu napięcia źródła i ich wpływ na moc reaktora może być w rozważaniach pominięty. Przy takich założeniach rezystancję statyczną ślizgającego się łuku można określić ze stosunku wartości skutecznych pierwszych harmonicznych napięcia i prądu wyładowania, według zależności:

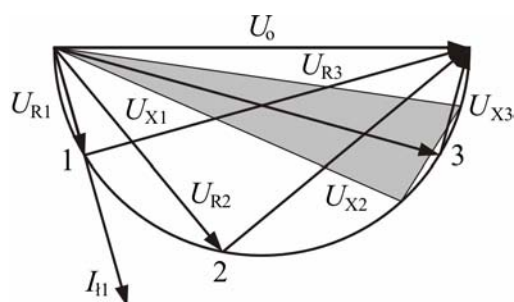


$$R_t = \frac{U_{11h}}{I_{11h}}. \quad (3.7)$$

Ponieważ prąd reaktora jest praktycznie sinusoidalny, rezystancja statyczna wyładowania może być też wyznaczona z mocy  $P_t$  i skutecznej wartości prądu  $I_t$ , według:

$$R_t = \frac{P_t}{I_t^2}. \quad (3.8)$$

Przy sinusoidalnym prądzie obie zależności dają jednakową wartość rezystancji statycznej łuku. Przy niewielkiej reaktancji wewnętrznej, gdy nie można pominąć odkształcenia prądu, zastępczą rezystancję statyczną łuku do uproszczonych rozważań, można wyznaczać z zależności (3.8). Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że w układach zasilania reaktorów plazmowych bez układu zapłonowego, moc bierna przesunięcia  $Q$  jest około 10 razy większa od mocy czynnej łuku  $P_t$ , natomiast moc bierna odkształcenia  $D_t$  nie przekracza 30% mocy czynnej łuku, a więc stanowi tylko 3% mocy biernej przesunięcia. Pomijając zatem moc odkształcenia, można przeprowadzić przybliżoną analizę wpływu stosunku reaktancji źródła (transformatora)  $X_w$  do rezystancji zastępczej ślizgającego się łuku  $R_t$ , posługując się w tym celu wykresem fazorowym dla pierwszych harmonicznym napięć i prądu, przedstawionym na rysunku 3.33.



Rys. 3.33. Wykres fazorowy napięć i prądów reaktora łukowego dla trzech wartości reaktancji źródła

Napięcie na zaciskach reaktora w stanie jałowym  $U_o$ , jest równoważone napięciem na reaktancji wewnętrznej źródła  $U_x$  i napięciem między elektrodami reaktora  $U_R$ . Wykres wielkości z indeksem 1 opisuje reaktor bez elektrody zapłonowej. Wówczas, napięcie źródła musi mieć wartość wystarczającą do zapłonu a jednocześnie źródło musi mieć tak dużą reaktancję wewnętrzną, aby napięcie między elektrodami przy płonącym łuku wynosiło od  $(0,1 \div 0,2) U_o$ . Wykorzystanie mocy transformatora zasilającego reaktor wyniesie wówczas około 20%. Współczynnik mocy  $\cos \phi$ , który można uznać za współczynnik wykorzystania mocy źródła, wyniesie około 0,15 a sprawność energetyczna układu będzie bardzo niska. Wykres wielkości z indeksem 2 opisuje reaktor plazmowy, w którym średnia wartość rezystancji statycznej łuku jest równa reaktancji źródła zasilania ( $R_l = X_w$  -przypadek dopasowania odbiornika do źródła). Przy założeniu stałej reaktancji  $X_w$  i regulowanej rezystancji wyładowania łukowego  $R_l$ , np. poprzez odstęp elektrod, oraz przy zapłonie z osobnego źródła, dla stałego napięcia  $U_o$ , moc oddawana ze źródła do łuku byłaby największa. W praktyce taki przypadek nie jest realizowany, bowiem duża strata napięcia na reaktancji wewnętrznej obniża wykorzystanie mocy źródła i jego sprawność. Pożądany punkt pracy reaktora plazmowego przedstawia wykres wielkości z indeksem 3 i obszar zakreślony wokół punktu 3 (Rys. 3.33).

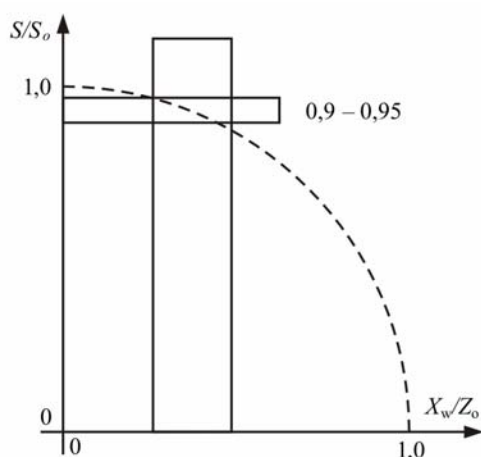
Moc źródła zasilania jest ograniczona napięciem w stanie jałowym i dopuszczalnym prądem  $I_o$ . Parametry reaktora plazmowego i układu zasilania powinny być tak dobrane, aby ich współpraca odbywała się z maksymalną mocą i sprawnością i aby była stabilna. Moc wyładowania łukowego nie może być większa od mocy odniesienia wynikającej z iloczynu napięcia i prądu, według:

$S_o = U_o \cdot I_o = S_{\max}$ , w którym:

$$I_o = \frac{U_o}{\sqrt{R_l^2 + X_w^2}}. \quad (3.9)$$

Dobierając odpowiednio reaktancję źródła zasilania można dowolnie przybliżyć moc czynną do mocy maksymalnej, jednak aby zapewnić dobrą stabilność pracy i małe przerwy bezprądowe, reaktancja nie powinna być mniejsza od 30% impedancji obwodu (rys. 3.34), co zapewnia wysoką sprawność i wykorzystanie mocy źródła do 95%.

Moc bierna odkształcenia, w ślizgającym się wyładowaniu łukowym, jest znacznie mniejsza od mocy biernej przesunięcia występującej w układzie zasilania i jej wpływ na straty mocy, wymiary układu i moc pobieraną z sieci jest pomijalny. W rozdziale 4.5 pracy przedstawiono porównanie mocy i sprawności wybranych stosowanych w praktyce, układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.



Rys. 3.34. Wpływ reaktancji źródła zasilania na wykorzystanie jego mocy, gdzie:  $S = UI$ ,  $Z_o = U/I$  – impedancja obciążenia

Wynika z niego, że zaproponowany do zasilania takich reaktorów układ zintegrowany, dzięki m. in. minimalizacji mocy biernej przesunięcia, ma najwyższą sprawność, spośród stosowanych w praktyce układów, charakteryzując się przy tym prostą budową, dużą niezawodnością i niskimi kosztami eksploatacji [90, 95, 101, 103, 147, 148].

### **3.4. Podsumowanie**

Reaktory z wyładowaniami barierowymi oraz ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym są dobrym źródłem nietermicznej i nierównowagowej plazmy dla celów technologicznych. Praca przy ciśnieniu atmosferycznym, niezbyt wysokie wymagania odnośnie zasilania w energię elektryczną, prosta budowa komór wyładowczych i możliwość pracy z niemal wszystkimi gazami sprawiają, że ich zastosowanie w technologiach plazmowych jest już dosyć powszechne i będzie się rozszerzało. O sprawności procesu generacji plazmy w reaktorze plazmowym przesądza jednak układ zasilania w energię elektryczną, za pomocą którego steruje się parametrami plazmy. W następnym rozdziale podano wymagania stawiane układom zasilania reaktorów nietermicznej plazmy oraz omówiono wybrane ich rozwiązania.

#### **4. UKŁADY ZASILANIA REAKTORÓW PLAZMY NIETERMICZNEJ**

Reaktory plazmowe są bardzo nietypowymi odbiornikami energii elektrycznej. Ich charakterystyki makroskopowe mają charakter silnie nieliniowy a praca odbywa się zwykle przy wysokim napięciu, często o podwyższonej lub wysokiej częstotliwości. Moc wyładowań, która jest miarą wydajności reaktora plazmowego, jest regulowana wartością napięcia bądź prądu, w zależności od rodzaju wyładowań a poprawna współpraca reaktora plazmowego, który w zastosowaniach przemysłowych jest urządzeniem dużej mocy, z siecią zasilającą, wymaga dodatkowych urządzeń takich jak: układy kompensacji mocy biernej oraz filtry zmniejszające odkształcenia prądu sieciowego.

Poprawna praca reaktora plazmowego zależy od charakterystyk układu zasilania. Z drugiej strony układ zasilania reaguje na tak nietypowy odbiornik, jakim jest reaktor plazmowy. Dlatego układ zasilania reaktora plazmowego, musi być projektowany i konstruowany razem z reaktorem plazmowym.

Do zasilania reaktorów plazmowych stosuje się w praktyce różne źródła zasilania, które można podzielić dwie zasadnicze grupy:

- układy transformatorowe, wykorzystujące właściwości obwodów magnetycznych,
- układy z elementami energoelektronicznymi.

Te ostatnie, z uwagi na olbrzymi postęp w dziedzinie energoelektroniki, są coraz częściej stosowane do zasilania reaktorów plazmowych. Zastosowanie najnowszych, w pełni sterowalnych elementów półprzewodnikowych takich jak: tranzystory GTO, MOSFET i IGBT, pozwala konstruować układy zasilania reaktorów plazmowych o dużych mocach i wysokich częstotliwości przełączania. Zasilacze przekształtnikowe mogą zapewnić, wymaganą przez reaktor plazmowy, charakterystykę prądowo-napięciową i dobre właściwości regulacji prądu, napięcia, mocy i częstotliwości. Umożliwiają ponadto automatyzację pracy reaktora pla-

zmowego, poprzez sterowanie położeniem elektrod, składem i wielkością przepływu gazu poddawanego obróbce, temperaturą plazmy.

Aby dokonać wyboru i zaprojektować układ zasilania do danego procesu plazmowego, należy określić wymagania i parametry odbiornika plazmowego, z których najważniejsze to:

- napięcie zasilania,
- rodzaj prądu zasilania,
- sposób realizacji zapłonu wyładowania,
- moc odbiornika i możliwa do realizacji moc układu zasilania,
- możliwość regulacji wartości prądu i zachowania jego ciągłości w całym obszarze pracy reaktora plazmowego,
- zdolność źródła zasilania do pracy w układach automatycznego sterowania i regulacji oraz dostosowania parametrów do różnych gazów plazmotwórczych oraz ich mieszanin,
- poprawna współpraca z siecią zasilającą,
- wysoka sprawność,
- prostota i bezpieczeństwo obsługi,
- niskie koszty budowy i eksploatacji.

Aby spełnić wymienione wymagania reaktorów plazmowych ich układy zasilania są bardzo rozbudowane. Obok układu zasilania w energię elektryczną, zawierają układy przygotowania gazu, regulacji jego prędkości oraz układy zabezpieczeń. W dalszej części książki przedstawiono podstawowe typy układów stosowanych do zasilania urządzeń plazmowych. Są to między innymi układy wykorzystujące specjalnej konstrukcji transformatory i nieliniowość charakterystyki magnesowania ich rdzeni, oraz układy bazujące na technice półprzewodnikowej. Podany podział jest umowny, bowiem wszystkie wymienione układy mogą zawierać elementy magnetyczne i energoelektroniczne.

W ostatnim czasie coraz większe zastosowania w procesach generacji nietermicznej plazmy znajdują układy z energią impulsową. Dzięki doskonaleniu technologii obwodów półprzewodnikowych i scalonych,

a także właściwości materiałów magnetycznych, wykorzystanie energii impulsowej do zasilania reaktorów plazmowych wzrasta.

#### **4.1. Układy transformatorowe**

Niezależnie od rodzaju wyładowań elektrycznych wykorzystywanych do generacji plazmy, każdy układ zasilania reaktorów plazmowych jest wyposażony w transformator, który w odpowiednim wykonaniu jest najprostszym układem zasilania. Transformuje on napięcie do wymaganego poziomu umożliwiającego zapłon wyładowań, a dzięki specjalnej konstrukcji może ograniczać prąd w obwodzie z wyładowaniem. Stosując różne połączenia transformatorów, można zasilac zarówno reaktory plazmowe dwu-, trój-, jak i wieloelektrodowe.

Transformatorowe układy zasilania reaktorów łukowych można wyposażać w wydzielone, wysokiej częstotliwości, układy zapłonowe, wykonane w postaci modułów elektronicznych dających napięcie zapłonu o częstotliwości (20÷40) kHz, co zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia zapłonu wyładowania a jednocześnie wpływa na zmniejszenie gabarytów układu zapłonowego.

Regulację mocy dostarczanej do przestrzeni wyładowań, można realizować w układach transformatorowych poprzez zmiany napięcia zasilającego (autotransformator, odczepy po stronie pierwotnej) lub stosując energoelektroniczne regulatory mocy.

Wśród transformatorowych układów zasilania omówione zostaną układy do zasilania reaktorów plazmy ślizgającego się łuku (zintegrowany i z transformatorem pięciokolumnowym) oraz wyładowań barierowych (magnetyczny mnożnik częstotliwości).

Idea zintegrowanego układu zasilania powstała przy współudziale autorki monografii [147]. Rozwiązania takich układów zostały opatentowane [6, 90, 148], i stały się podstawą do budowy kilkunastu zasilaczy, pracujących obecnie w laboratoriach w Polsce, m.in. w Instytucie Chemii

Przemysłowej w Warszawie, w Przemysłowym Instytucie Elektroniki i w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej, oraz we Francji, w Uniwersytecie w Orleanie [5, 127].

Modyfikacją układu zintegrowanego, jest zastosowanie transformatora pięciokolumnowego w układzie zasilania reaktora plazmowego. Taki zasilacz został zbudowany w ramach realizacji rozprawy doktorskiej [129] i poddany badaniom, które potwierdziły jego dobre właściwości do zasilania łukowych reaktorów plazmowych.

#### **4.2. Zintegrowany układ zasilania**

Reaktory plazmowe ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, których rozwiązania i charakterystyki przedstawiono w rozdziale 3.3, mają względem układu zasilania inne wymagania niż reaktory z innymi rodzajami wyładowań elektrycznych. Zapłon wyładowania jest realizowany przy napięciu kilkunastu kilowoltów (w zależności od odstępów elektrod roboczych), natomiast napięcie płonącego wyładowania ma wartość kilka do kilkunastu razy mniejszą i wynosi kilkaset woltów. Ta dysproporcja napięć zapłonu i stabilnej pracy oraz silna nieliniowość konduktancji wyładowania stwarza trudne zadanie dla układu zasilającego, który musi posiadać właściwości zarówno wysokonapięciowego układu zapłonowego, jak i układu nadążającego za szybkimi zmianami czasowymi nieliniowej charakterystyki prądowo-napięciowej ślizgającego się wyładowania łukowego [147].

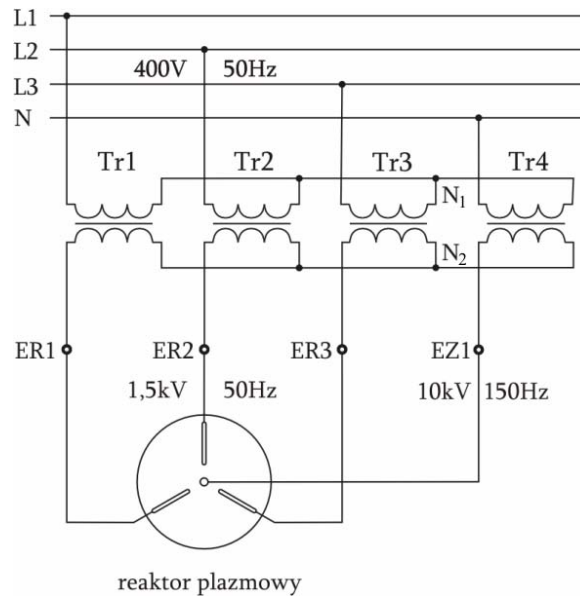
W układach laboratoryjnych, instalacjach pilotujących i układach przemysłowych stosowane są systemy zasilania, w których głównym elementem jest transformator. W najprostszym rozwiązaniu jest to klasyczny transformator energetyczny, a wówczas, wymuszony charakterystyką reaktora, spadek napięcia po zapłonie musi być kompensowany dodatkowymi dławikami, które należy włączyć w szereg z każdą parą elektrod reaktora. Jednocześnie dławiki ograniczają prąd elektrod. Za-



miast dławików można także stosować transformatory o powiększonej reaktancji wewnętrznej.

Zjawisko nieliniowości charakterystyki magnesowania jest nieodłączną cechą obwodów z rdzeniem magnetycznym i w klasycznych transformatorach energetycznych staramy się minimalizować jego wpływ na charakterystyki transformatora. W układzie zintegrowanym wykorzystano wyższe harmoniczne napięć indukowanych w rdzeniach transformatorów roboczych do zapłonu wyładowania [5, 6, 89, 90, 102, 104, 183, 188]. Przykładowe rozwiązanie układu zintegrowanego prezentuje rys. 4.4.

W podstawowym rozwiązaniu układu zintegrowanego trzy jednofazowe transformatory robocze, o obwodach magnetycznych zapewniających swobodne drogi powrotne dla wyższych harmonicznych strumienia magnetycznego, są zasilane z symetrycznej sieci trójfazowej.



Rys. 4.4. Zintegrowany układ zasilania reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

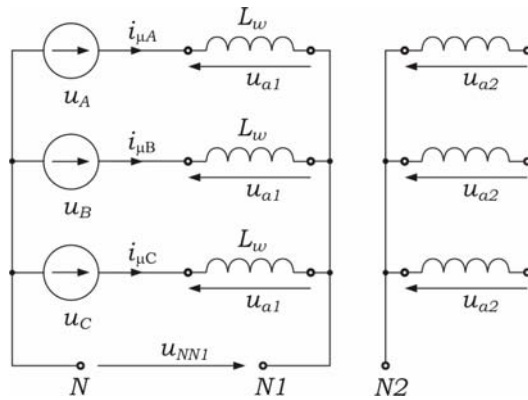
Zarówno uzwojenia pierwotne jak i wtórne transformatorów są połączone w gwiazdę, przy czym zaciski uzwojeń wtórnych są dołączone do

elektrod reaktora plazmowego. Czwarty transformator, zwany zapłonowym, jest włączony na napięcie  $U_{NN1}$ , jakie indukuje się pomiędzy punktem neutralnym  $N$  trójfazowej sieci zasilającej i punktem gwiazdowym  $N_1$  uzwojeń pierwotnych transformatorów roboczych (Rys. 4.4 i 4.6). Napięcie na wyjściu transformatora zapłonowego ma wartość wystarczającą do zjonizowania przestrzeni międzyelektrodowej, umożliwiając zapłon wyładowania między elektrodami głównymi reaktora. Po zapłonie wyładowanie jest przejmowane i podtrzymywane przez transformatory robocze, które są zaprojektowane i zbudowane na napięcie kilkanaście razy niższe od napięcia zapłonu. Trzy razy większa częstotliwość napięcia zapłonowego, w stosunku do napięcia pracy, poprawia skuteczność zapłonu i skraca przerwy bezprądowe.



Rys. 4.5. Zdjęcie wnętrza zasilacza zintegrowanego o mocy 5kW

Istotną cechą układu zintegrowanego jest możliwość kształtowania i dopasowania jego charakterystyki zewnętrznej do potrzeb reaktora plazmowego [148]. Podstawowe cechy zintegrowanego układu zasilania zostaną prześledzone na podstawie schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 4.6.



Rys. 4.6 Schemat zastępczy układu zintegrowanego

Przy zasilaniu uzwojeń pierwotnych transformatorów roboczych trójfazowym napięciem sinusoidalnym ( $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ ) nieliniowe charakterystyki magnesowania rdzeni powodują, że prąd magnesujący jest odkształcony i dla fazy A może być zapisany jako:

$$i_A(t) = I_{1m} \sin t - I_{5m} \sin 5t + I_{7m} \sin 7t + \dots \quad (4.1)$$

Tak odkształcony prąd magnesujący indukuje w rdzeniu jednofazowego transformatora odkształcone strumienie magnetyczne:

$$\Phi_t = \Phi_1 \sin t + \Phi_3 \sin 3t + \Phi_9 \sin 9t + \dots \quad (4.2)$$

W transformatorach jednofazowych wyższe harmoniczne strumienia magnetycznego mają swobodne drogi powrotne i dzięki temu osiągają znaczne wartości. W indukowanym przez odkształcony strumień  $\Phi_t$  napięciu fazowym  $u_{a1}$  (rys. 4.6) możemy uwzględnić tylko pierwszą i trzecią harmoniczną, ponieważ dziewiąta stanowi zaledwie 1% podstawowej harmonicznnej, i dla fazy A zapisać:

$$u_{a1} = u_{a1h} - u_{a3h} = U_{1m} \sin t - U_{3m} \sin 3t.$$

Dla strony pierwotnej układu z rys. 4.6 zapiszemy:

$$\begin{aligned} u_{NN1} &= u_A - u_{a1h} + u_{a3h} \\ u_{NN1} &= u_B - u_{b1h} + u_{b3h} \\ u_{NN1} &= u_C - u_{c1h} + u_{c3h} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Po dodaniu równań (4.3) stronami oraz uwzględniając, że:

$$\begin{aligned} u_A + u_B + u_C &= 0 \\ u_{a1h} + u_{b1h} + u_{c1h} &= 0, \\ u_{a3h} = u_{b3h} = u_{c3h} &= u_3 \end{aligned}$$

otrzymamy:

$$u_{NN1} = u_3 \quad (4.4)$$

$$u_{NN1} = U_{3m} \sin 3 t. \quad (4.5)$$

Wartość skuteczna napięcia, pomiędzy punktami neutralnymi układu, wynosi:

$$U_{NN1} = 3\sqrt{2} f N_1 A_{Fe} B_{3h}, \quad (4.6)$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość sieci zasilającej,

$N_1$  – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego transformatora,

$A_{Fe}$  – pole przekroju rdzenia,

$B_{3h}$  – indukcja trzeciej harmonicznej.

Wartość trzeciej harmonicznej indukcji magnetycznej określona jest stanem nasycenia oraz kształtem charakterystyki magnesowania  $B=f(H)$  transformatora roboczego. Stopień nasycenia odnosi się do amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji  $B_{1h}$ , określonej wartością napięcia zasilającego. Wartość indukcji trzeciej harmonicznej możemy wyznaczyć analitycznie odpowiednio aproksymując krzywą magnesowania. W praktyce, ponieważ wysoka dokładność obliczenia wartości napięcia  $U_{NN'}$  nie jest konieczna i można dopuścić dosyć szeroki przedział jego zmienności ( $\pm 10\%$ ), wartość trzeciej harmonicznej indukcji  $B_{3h}$  można określić szacunkowo. Dla indukcji  $B_{1h}$ , stosowanych w transformatorach z przedziału (1,5÷2)T, wartość trzeciej harmonicznej indukcji stanowi około 20% pierwszej harmonicznej ( $B_3 \approx 0,2 B_1$ ). Napięcie pomiędzy punktami neutralnymi wyniesie więc około 50% do 60% napięcia fazowego strony pierwotnej transformatorów:

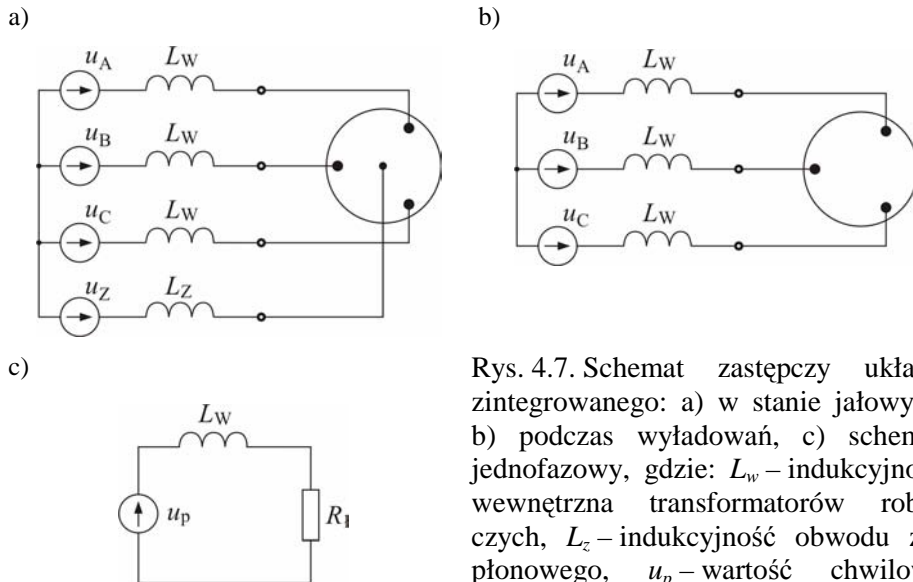
$$U_{NN1} = (0,5 \div 0,6)U_{1f}. \quad (4.7)$$

Jeżeli do zacisków *NN1* przyłączymy jednofazowy transformator o odpowiedniej przekładni, to na jego zaciskach wyjściowych otrzymamy napięcie potrojonej częstotliwości o wymaganej dla zapłonu wartości. Charakterystyka zewnętrzna tak włączonego transformatora ( $U_2 = f(I_2)$  przy  $U_1 = const$ ), będzie tak samo podatna jak magnetycznego potrajacza częstotliwości i może być on wykorzystany do zapłonu reaktorów plazmowych. Napięcie zapłonu jest 5 ÷ 10 razy wyższe od napięcia pracy reaktora plazmowego i dlatego stosuje się układy z wydzielonym transformatorem zapłonowym, choć teoretycznie możliwa jest współpraca uzwojeń roboczych i zapłonowych umieszczonych na jednym rdzeniu, pod warunkiem zastosowania odpowiedniej izolacji [6].

W stanie jałowym układu zasilania, tj. gdy między elektrodami reaktora plazmowego łuk nie płonie, amplituda napięcia transformatora zapłonowego (150 Hz), w kolejnych półokresach napięcia zasilającego, sumuje się z amplitudą napięcia każdej fazy trójfazowego transformatora roboczego (50 Hz). Stan jałowy układu odwzorowuje schemat zastępczy na rys. 4.7a. Prąd transformatora zapłonowego nie przekracza 1% prądu roboczego elektrod i w analizie cyklu pracy reaktora, gałąź zapłonowa może być pominięta, a schemat zastępczy uprości się do postaci b) z rys. 4.7, a nawet, z uwagi na symetrię, do schematu jednofazowego (Rys. 4.7c). Wartości chwilowe napięć fazowych strony wtórnej można zapisać następująco:

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \sin t + U_{zm} \sin 3 t \\ u_B &= U_m \sin\left(t - \frac{2}{3}\right) + U_{zm} \sin 3 t, \\ u_C &= U_m \sin\left(t + \frac{2}{3}\right) + U_{zm} \sin 3 t \end{aligned} \quad (4.8)$$

gdzie:  $U_m$  – amplituda napięcia wtórnego fazowego transformatorów roboczych,  $U_{zm}$  – amplituda napięcia wtórnego transformatora zapłonowego.

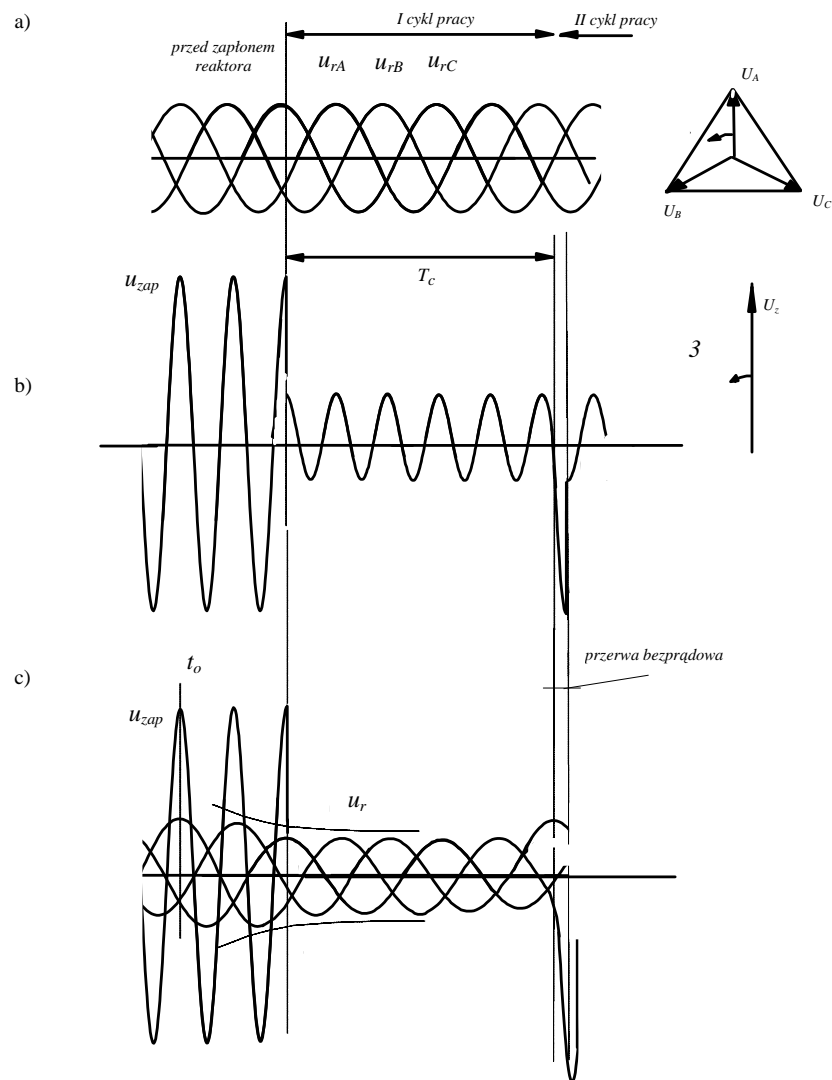


Rys. 4.7. Schemat zastępczy układu zintegrowanego: a) w stanie jałowym, b) podczas wyładowań, c) schemat jednofazowy, gdzie:  $L_w$  – indukcyjność wewnętrzna transformatorów roboczych,  $L_z$  – indukcyjność obwodu zapłonowego,  $u_p$  – wartość chwilowa napięcia przewodowego,  $R_l$  – rezystancja zastępcza łuku

Chwilowe przebiegi napięć transformatorów roboczych i transformatora zapłonowego w stanie jałowym i podczas pierwszego cyklu pracy reaktora przedstawiono na rysunku 4.8. Przed zapłonem maksymalne napięcie występuje między elektrodą zapłonową, umieszczoną w środku trójkąta wyznaczonego przez elektrody robocze, a poszczególnymi elektrodami roboczymi z częstotliwością 300 Hz. Z chwilą wystąpienia kolejnego zapłonu (po czasie nie dłuższym niż 1,7 ms od zgaśnięcia wyładowania) napięcie transformatora zapłonowego maleje do wartości napięcia fazowego transformatorów roboczych i rozpoczyna się kolejny cykl pracy reaktora. Kiedy po czasie  $T_c$  łuk przeniesie się, pod wpływem przepływu gazu, w strefę gaśnięcia, kończy się cykl pracy reaktora, wyładowanie gaśnie, wzrasta natychmiast napięcie zapłonu, następuje zapłon i kolejny cykl pracy reaktora.

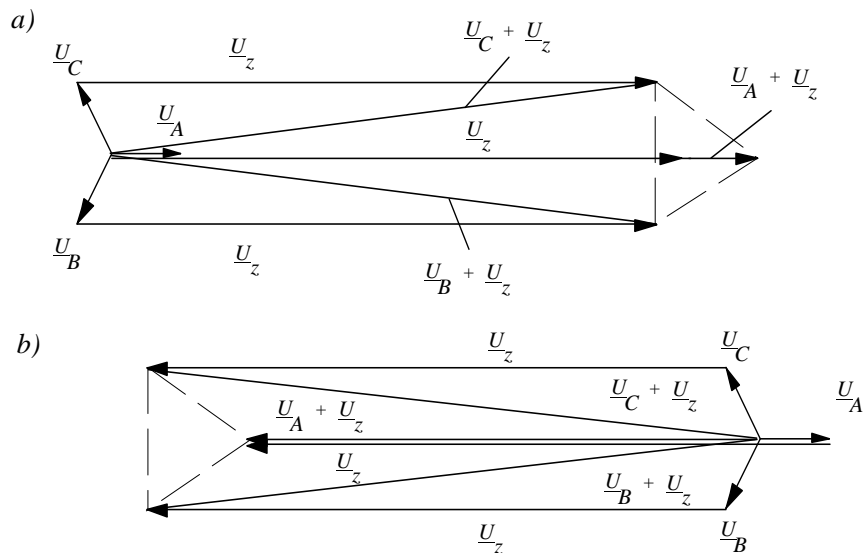
Czas potrzebny do odbudowy napięcia zapłonu jest nie dłuższy niż  $1/12$  okresu przy częstotliwości 50 Hz, tj. około 1,7 ms. Czas cyklu pra-

cy zależy od wymiarów i kształtu elektrod oraz prędkości przepływu gazu i trwa od kilku do kilkunastu okresów.



Rys. 4.8. Przebiegi chwilowych wartości napięć w układzie zintegrowanym: a) napięcia na elektrodach roboczych (50 Hz), b) napięcie transformatora zapłonowego 150 Hz, c) największa wartość napięcia między elektrodą roboczą i zapłonową, (na rysunku, z uwagi na jego przejrzystość, nie dotrzymano proporcji między napięciem zapłonu a napięciem pracy)

Uzwojenia wtórne transformatora zapłonowego można tak połączyć względem uzwojeń wtórnych transformatorów roboczych, że amplitudy ich napięć będą się na elektrodach reaktora plazmowego dodawać lub odejmować. Odpowiadające obu tym połączeniom wykresy fazorowe dla pierwszej harmonicznej napięcia roboczego (50 Hz) i pierwszej harmonicznej napięcia zapłonu 150 Hz w stanie jałowym dla czasu  $t = t_0$  (rys. 4.7c) i w czasie przerw bezprądowych przedstawia rysunek 4.9. Połączenie uzwojeń, któremu odpowiada wykres z rysunku 4.9 a daje wyższe napięcie zapłonu i takie powinno być realizowane w praktyce.

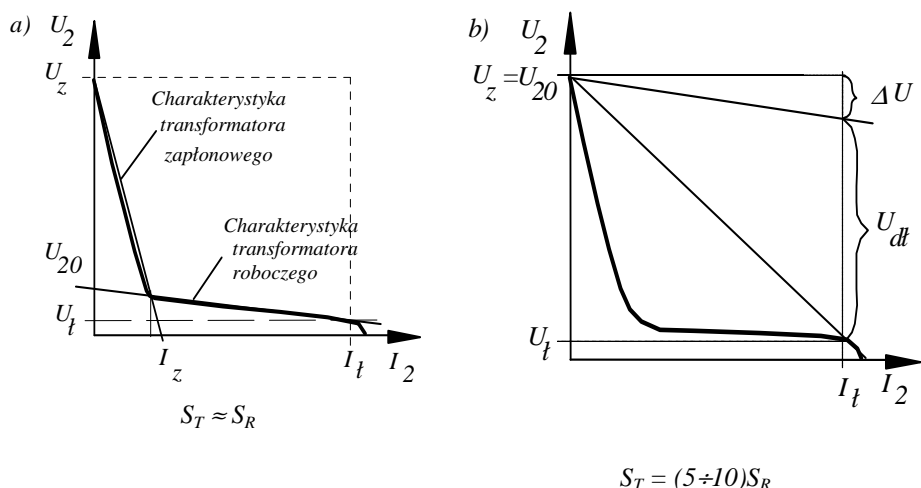


Rys. 4.9. Wykres fazorowy napięć na zaciskach elektrod reaktora zasilanego układem zintegrowanym w stanie jałowym: a) przy połączeniu zgodnym uzwojeń transformatora zapłonowego względem uzwojeń transformatora roboczego, b) przy połączeniu przeciwnym

Przykładową charakterystykę prądowo-napięciową reaktora plazmowego, zasilanego z układu zintegrowanego (napięcie pary elektrod, w funkcji prądu elektrod  $U = f(I)$ ), przedstawiono na rysunku 4.10 a. Dla porównania przedstawiono na tym samym rysunku charakterystykę ze-



wnętrzną reaktora plazmowego, zasilanego z transformatora z dławikami (rys.4.10b).

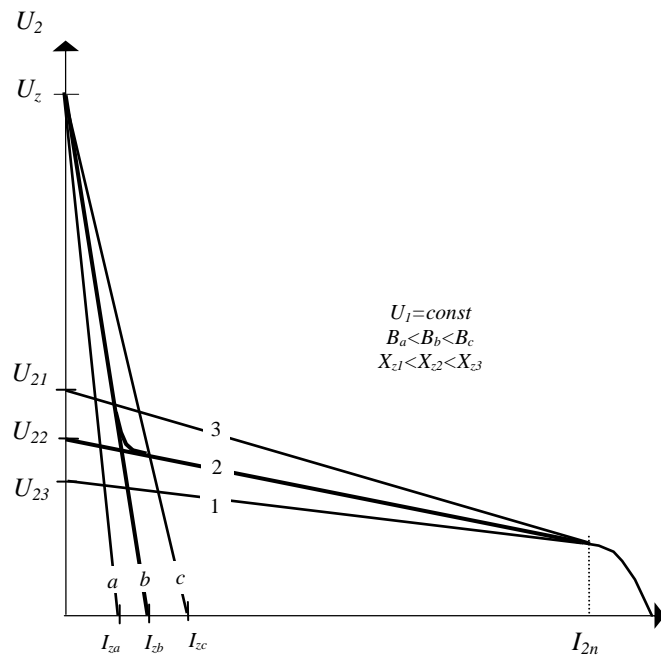


Rys. 4.10. Charakterystyka zewnętrzna reaktora plazmowego: a) zasilanego z układu zintegrowanego, b) zasilanego z transformatora z dławikami;  $\Delta U$  – strata napięcia w transformatorze,  $U_{dt}$  – spadek napięcia na dławiku ograniczającym prąd elektrod

Moc pozorna transformatora  $S_T$ , w układzie z dławikami ograniczającymi prąd (Rys. 4.10 b), jest około 5÷10 razy większa od mocy reaktora plazmowego,  $S_R$ . Natomiast w układzie zintegrowanym moc transformatora roboczego jest w przybliżeniu równa mocy reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym (Rys. 4.10 a). Tak duże zmniejszenie mocy i obniżenie napięcia transformatora roboczego w układzie zintegrowanym przynosi mniejsze zużycie materiałów, obniża koszty budowy oraz podwyższa sprawność energetyczną transformatora.

Główną cechą układu zintegrowanego jest możliwość dopasowania jego charakterystyki prądowo-napięciowej do wymagań reaktora plazmowego. Ideę metody kształtowania charakterystyki zewnętrznej układu zasilania reaktora do plazmowej obróbki gazów, przedstawia rys. 4.11. Dobierając na etapie projektowania poziom indukcji w rdzeniach transformatorów zasilacza oraz wartość reaktancji rozproszenia

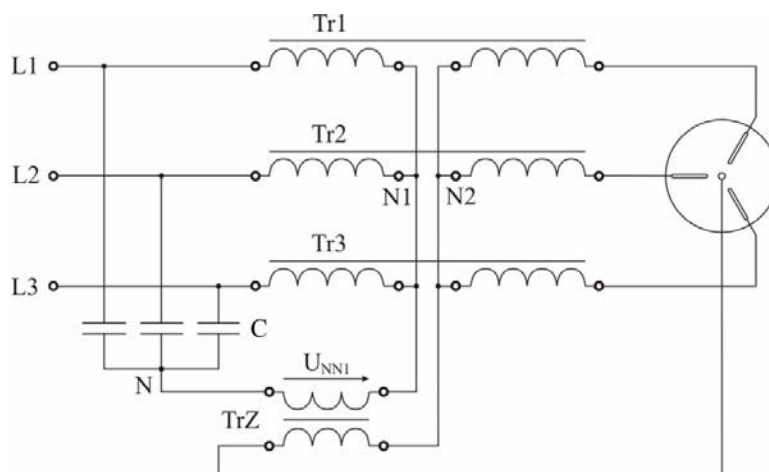
uzwojeń, można wpływać zarówno na nachylenie charakterystyki zewnętrznej obwodu zasilającego elektrody robocze, jak i transformatora zapłonowego.



Rys. 4.11. Idea metody wyznaczania charakterystyki prądowo-napięciowej  $U_2 = f(I_2)$  zintegrowanego układu zasilania: 1, 2 i 3 – charakterystyki transformatorów roboczych dla różnych wartości reaktancji zwarcia; a, b i c – charakterystyki transformatora zapłonowego dla trzech wartości indukcji w rdzeniach transformatorów roboczych (na rysunku nie zachowano proporcji między prądem elektrod roboczych a prądem transformatora zapłonowego)

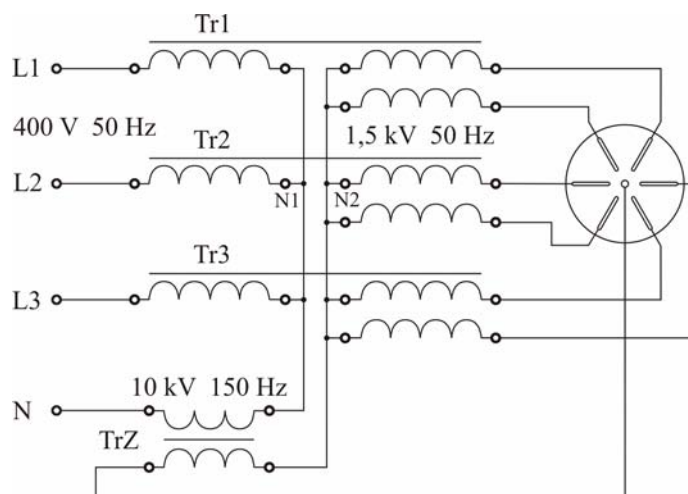
Przedstawiona idea układu zintegrowanego może być wykorzystana także w układach bez dostępnego punktu neutralnego sieci zasilającej (sieć trójprzewodowa), wówczas rolę punktu neutralnego odgrywa sztuczny punkt gwiazdowy, który może być zrealizowany z trzech połączonych w gwiazdę kondensatorów (rys. 4. 12). W układzie z rysunku 4.12 kondensatory służą do kompensacji mocy biernej układu a także zwiększają amplitudę napięcia zapłonu.

Inne rozwiązania układu zintegrowanego do zasilania reaktorów sześciu i dziewięcioelektrodowych przedstawiają rysunki 4.13 i 4.14.



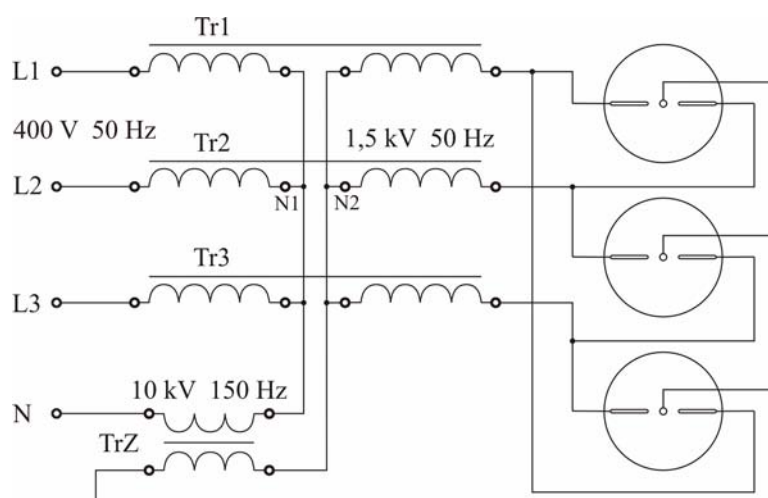
Rys. 4.12. Zintegrowany układ zasilania ze sztucznym punktem neutralnym utworzonym z kondensatorów

Transformatory robocze w układzie z rysunku 4.13 mają dzielone uzwojenia wtórne. W ten sposób układ może służyć do zasilania reaktora 6-elektrodowego lub dwóch reaktorów 3-elektrodowych pracujących szeregowo dla przepływu gazu roboczego.



Rys. 4.13. Układ zintegrowany zasilający reaktor sześcielektrodowy

Układ zasilania z rys. 4.14, dzięki trójstopniowemu połączeniu elektrod roboczych (dwie z trzech elektrod roboczych i jedna elektroda zapłonowa w każdym stopniu), pozwala na zwiększenie przestrzeni objętej wyładowaniem i może mieć zastosowanie do utylizacji gazów wylotowych przy dużych ich przepływach tak, aby przedłużyć czas przebywania zanieczyszczonego gazu w przestrzeni objętej plazmą.



Rys. 4.14. Układ zintegrowany zasilający reaktor dziewięcioelektrodowy

#### 4.2.1. Transformator pięciokolumnowy w układzie zasilania reaktorów łukowych

Do zasilania łukowych reaktorów plazmowych różnych typów, a w szczególności wieloelektrodowych reaktorów plazmy ślizgającego się łuku elektrycznego z wydzielonymi układami zapłonowymi, mogą być stosowane transformatory o rdzeniach pięciokolumnowych [129, 156, 167]. Podobnie jak przedstawione w poprzednim rozdziale układy zintegrowane, transformator pięciokolumnowy musi realizować podstawowe funkcje zasilacza, do których należą:

- wstępna jonizacja i zapłon wyładowania między elektrodami roboczymi reaktora plazmowego,
- podtrzymanie wyładowania elektrycznego między elektrodami roboczymi,
- zapewnienie cyklicznej pracy reaktora plazmowego,
- ograniczenie wartości prądu zwarcia.

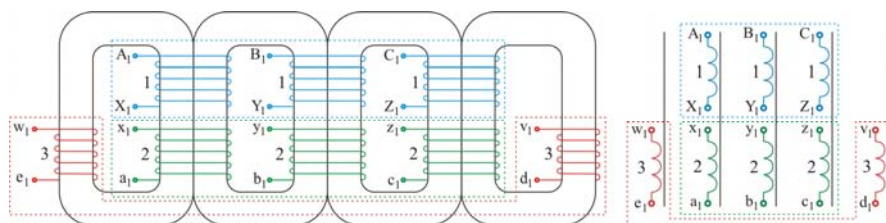
Różnice, jakie występują między układem zintegrowanym a układem z transformatorem pięciokolumnowym dotyczą sposobu realizacji wymienionych funkcji. W układach zintegrowanych funkcje związane z podtrzymaniem wyładowania oraz ograniczeniem prądu pełnią odpowiednio zaprojektowane transformatory jednofazowe o swobodnych drogach powrotnych dla strumienia magnetycznego. Natomiast wstępna jonizacja i przebieg przestrzeni międzyelektrodowych realizowane są bądź przez dodatkowy, odpowiednio włączony, transformator zapłonowy, bądź przez układ elektroniczny. W transformatorze pięciokolumnowym z uzwojonymi jarzmami (kolumnami zewnętrznymi) wszystkie wymienione zadania są realizowane w jednym urządzeniu.

Analizując układ zasilania z rdzeniem pięciokolumnowym (rys. 4.15), można w nim wyróżnić dwa obwody wtórne:

- obwód zasilający elektrody robocze reaktora plazmowego,
  - obwód zapłonu wyładowania,
- które pracują w zasadzie niezależnie.

Moc do reaktora plazmowego dostarczana jest przez obwód uzwojeń wtórnych, umieszczonych na wewnętrznych kolumnach fazowych, który zasila elektrody robocze reaktora plazmowego napięciem o wartości wymaganej dla prowadzonego procesu plazmowego.

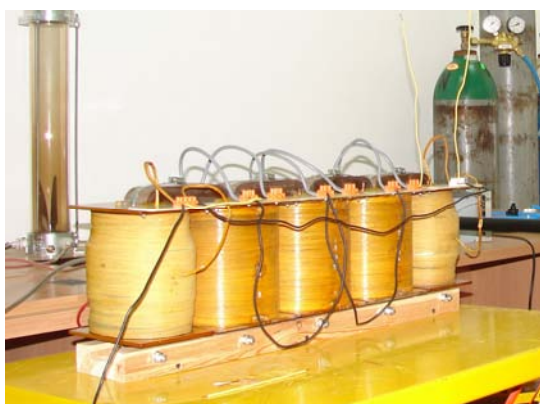
Aby ograniczyć prąd zwarcia, należy kształtować charakterystykę zewnętrzną transformatora, poprzez dobór reaktancji rozproszenia, która zależy od budowy uzwojeń pierwotnych i wtórnych oraz ich wzajemnego rozmieszczenia na rdzeniu. Układ zapłonowy składa się z dwóch uzwojeń wtórnych umieszczonych na kolumnach zewnętrznych transformatora.



Rys. 4.15. Uzwojenia kolumn transformatora pięciokolumnowego i jego schemat elektryczny: 1 – obwód pierwotny, 2 – obwód wtórny 3 – obwód zapłonowy

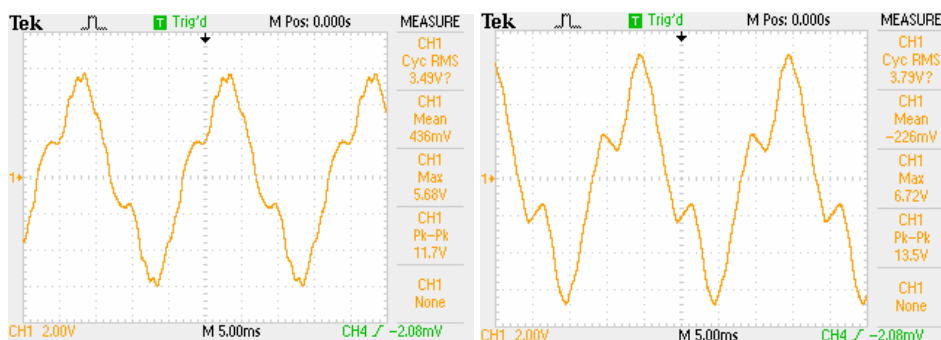
Uzwojenia kolumn zewnętrznych (zapłonowe) mogą pracować jako niezależne lub mogą być łączone szeregowo bądź równoległe. Łączenie szeregowe stosujemy w celu zwiększenia wartości napięcia zapłonowego, równoległe, gdy zachodzi konieczność zwiększenia prądu iskry zapłonowej, a praca niezależna może mieć miejsce przy zasilaniu dwóch reaktorów z oddzielnymi elektrodami zapłonowymi.

W celu zbadania właściwości układów zasilania bazujących na rdzeniach pięciokolumnowych zbudowano zasilacz (rys. 4.16) i zdjęto jego charakterystyki w różnych stanach pracy [129]. Transformator został zbudowany z rdzeni zwijanych, wykonanych z blachy transformatorowej ET-3. Zasadniczym zagadnieniem przy projektowaniu układów zasilania z transformatorami 5-kolumnowymi, jest kształtowanie charakterystyki zewnętrznej uzwojeń kolumn zewnętrznych, pełniących funkcję obwodu zapłonowego. Napięcie indukowane w tych uzwojeniach musi mieć wartość niezbędną do zapłonu wyładowania, a jednocześnie ich charakterystyka prądowo-napięciowa musi być podatna (miękka) tak, aby prąd w uzwojeniu zapłonowym był ograniczany do dowolnie niskiej wartości po przejściu wyładowania przez elektrody robocze tak, jak to dzieje się w układzie zintegrowanym.

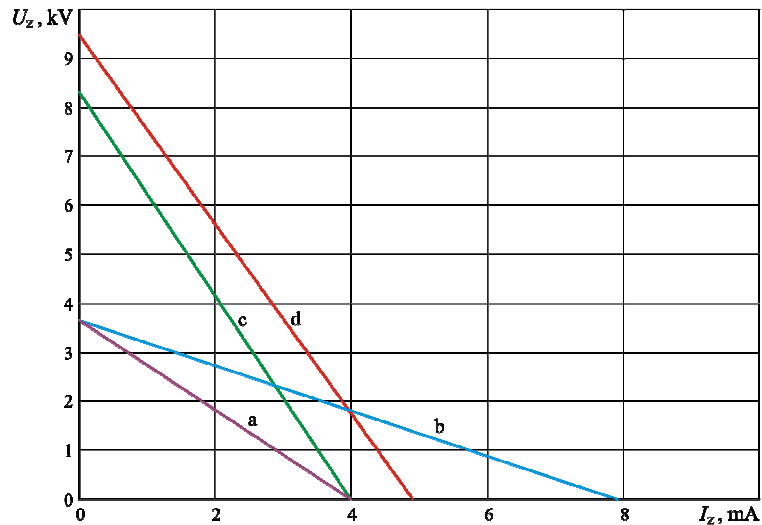


Rys. 4.16. Widok zasilacza reaktora plazmowego z rdzeniem 5-kolumnowym

Na rysunku 4.17 przedstawiono oscylogramy napięć indukowanych w zewnętrznych kolumnach transformatora pięciokolumnowego, a na rysunku 4.18 charakterystyki prądowo- napięciowe uzwojeń kolumn zewnętrznych, dla różnych połączeń uzwojeń obu kolumn i uzwojenia fazowego. Niezależnie od sposobu połączenia uzwojeń zapłonowych uzyskane charakterystyki są bardzo miękkie. Napięcie stanu jałowego wynosi od 3,7 kV do 9,5 kV a prąd zwarcia od 4 mA do 8 mA. Oznacza to, że z chwilą wystąpienia wyładowania na elektrodzie zapłonowej reaktora plazmowego, napięcie obniży się do napięcia elektrod roboczych (0,2÷1,2 kV), by ponownie wzrosnąć do wartości stanu jałowego w kolejnym cyklu pracy reaktora.

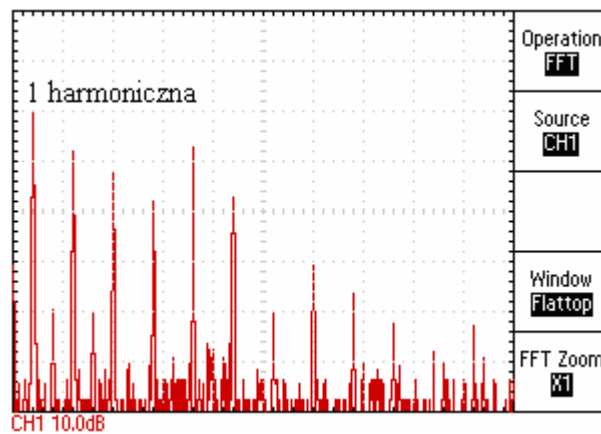


Rys. 4.17. Przebiegi napięć zmierzonych na uzwojeniach kolumn zewnętrznych transformatora 5-kolumnowego w stanie jałowym



Rys. 4.18. Charakterystyki zewnętrzne obwodu zapłonowego zasilacza dla różnych połączeń uzwojeń: a – jednego uzwojenia kolumny zewnętrznej, b – równoległego połączenia uzwojeń kolumn zewnętrznych, c – szeregowego połączenia uzwojeń kolumn zewnętrznych, d – szeregowego połączenia uzwojeń kolumn zewnętrznych i uzwojenia fazowego

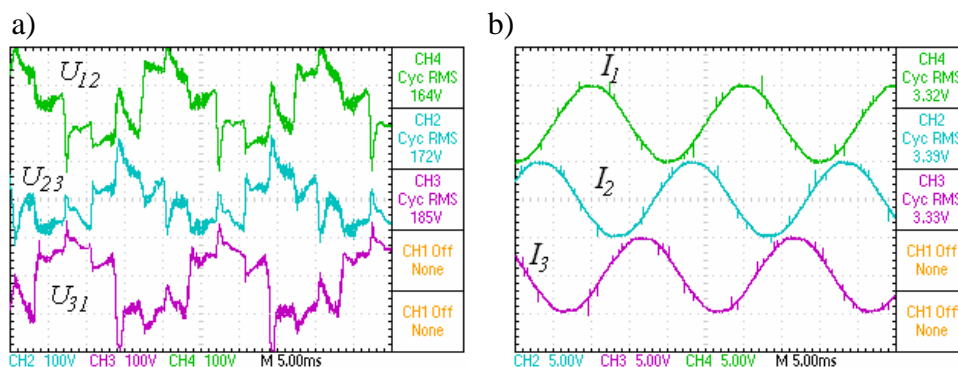
Mimo, że napięcia zapłonowe są znacznie odkształcone wyższymi nieparzystymi harmonicznymi, a w szczególności 3, 5, 7, 9 i 11 (rys. 4.19), to nie wpływa to negatywnie na zapłon wyładowania w reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.



Rys. 4.19. Spektrum wyższych harmonicznymi w napięciu uzwojenia kolumny zewnętrznej



Wartość skuteczna odkształconego napięcia indukowanego w kolumnie zewnętrznej wynosi 730 V, i jest poniżej wymaganej do zjonizowania przestrzeni międzyelektrodowej, ale chwilowe wartości maksymalne tego napięcia osiągają nawet 2 kV, co wystarcza do zjonizowania niewielkich przerw międzyelektrodowych występujących w strefie zapłonu reaktora plazmowego. Na rysunku 4.20 przedstawiono przebiegi napięć i prądów zasilacza z rdzeniem 5-kolumnowym, obciążonego reaktorem plazmowym.



Rys. 4.20. Przebiegi napięć fazowych (a) i prądów fazowych (b) strony wtórnej zasilacza przy obciążeniu reaktorem plazmowym

Napięcia fazowe strony wtórnej zasilacza, są odkształcone od sinusoidy (rys. 4.20 a), natomiast prąd strony wtórnej wszystkich faz zasilacza zachowuje przebieg sinusoidalny (rys. 4.20 b). W oscylogramach prądu nie obserwuje się przerw bezprądowych w okolicach przejścia prądu przez zero, charakterystycznych dla łuków intensywnie chłodzonych, oraz nie występuje przesunięcie fazowe między prądem a napięciem. Wskazuje to na rezystancyjny charakter odbiornika, jakim jest trójfazowy reaktor plazmowy ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Za korzystny należy uznać fakt, że zwarcie uzwojeń kolumn zewnętrznych zasilacza nie wpływa na wartości napięć zasilających elektrody robocze reaktora plazmowego.

Zbudowany zasilacz i przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że strumienie zamykające się w kolumnach zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego mogą być wykorzystane do zapłonu wyładowania w reaktorach plazmowych.

Charakterystyka prądowo-napięciowa uzwojonych kolumn zewnętrznych transformatora jest na tyle podatna, że uniemożliwia wystąpienie w układzie zapłonowym wyładowań o dużej mocy, co zapobiega przeciążeniu prądowemu i termicznemu układowi zapłonowego oraz uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora. Naturalna współpraca układu zapłonowego z układem zasilania elektrod roboczych, zapewniając cykliczny zapłon wyładowania i stabilną pracę reaktora bez występowania przerw bezprądowych, jest istotną cechą zasilacza transformatorowego bazującego na rdzeniu 5-kolumnowym.

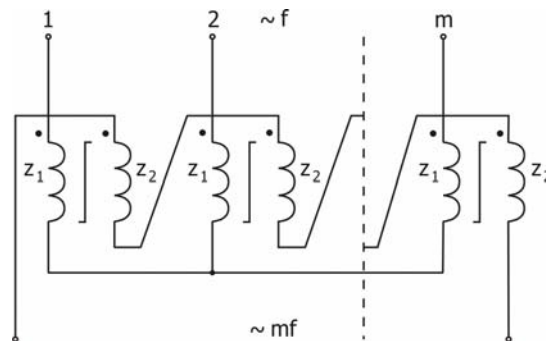
Wyładowanie iskrowe w układzie zapłonowym zachodzi wielokrotnie w czasie jednego cyklu pracy reaktora, co poprawia warunki konieczne do zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych. Można zatem stwierdzić, że układy transformatorowe na rdzeniach pięciokolumnowych stanowią dobre źródła zasilania dla reaktorów plazmy ślizgającego się łuku elektrycznego, a oprócz wyżej wymienionych cech, charakteryzują się prostą budową, pewnością działania i niskimi kosztami eksploatacyjnymi, co predestynuje je szczególnie do zastosowań przemysłowych [121, 129, 163, 175, 178].

### **4.3. Układy zasilania reaktorów z wyładowaniami barierowymi**

Wydajność generatora ozonu zależy od elektrycznych parametrów układu zasilającego takich jak: wartość napięcia, jego częstotliwość i kształt (rozdział 3.1, str. 68). Podwyższenie częstotliwości napięcia zasilającego jest jednym ze sposobów zwiększenia wydajności reaktora z wyładowaniami barierowymi, jednak konieczność wyposażenia układu w dodatkowe układy przekształcania częstotliwości, zwiększa sumarycz-

ne straty mocy w systemie i czyni proces generacji ozonu mniej sprawnym, niż przy częstotliwości sieciowej (rozdział 4.5) [2, 88, 98, 99, 101].

W układach zasilania reaktorów plazmowych z wyładowaniami barierowymi, wykorzystuje się transformatory pracujące w zakresie nieliniowości ich charakterystyki magnesowania w konfiguracji mnożnikowej, w której częstotliwość robocza jest krotnością częstotliwości podstawowej. Podwyższenie częstotliwości wynika z układu połączeń transformatorów jednofazowych, o rdzeniach zapewniających swobodne drogi powrotne dla wyższych harmonicznych strumienia magnetycznego. Podstawowy schemat magnetycznego  $m$ -krotnika częstotliwości przedstawiono na rysunku 4.21. W praktyce przemysłowej wykorzystywane są mnożniki magnetyczne o krotnościach powielania częstotliwości równych  $m = 3$  (potrójniki),  $m = 5$  (pięciokrotniki) i  $m = 9$  (dziewięciokrotniki) [212, 213]. Jak wynika z przedstawionej na rysunku 4.21 struktury, mnożnik magnetyczny prezentuje pełną analogię z transformatorem.

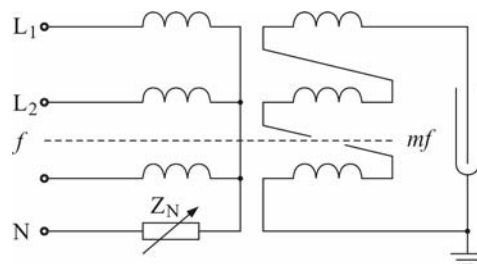


Rys. 4.21. Schemat magnetycznego mnożnika częstotliwości o krotności powielania równej,  $m$  – liczba faz mnożnika,  $z_1$  i  $z_2$  – odpowiednio liczba zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego

Jednakże zjawiska, będące podstawą działania mnożnika magnetycznego są inne niż w transformatorze. Przy sinusoidalnym napięciu zasilającym, z uwagi na nieliniowość charakterystyki magnesowania, konieczność pracy w zakresie bliskim nasycenia (kolano charakterystyki magnesowania  $B = f(H)$ ) oraz brak przewodu neutralnego, prąd magnesujący

jest odkształcony i nie zawiera harmonicznych o kolejności zerowej (dla  $m = 3$ , są to harmoniczne rzędu  $km$ , gdzie  $k = 1, 3, 5, 7, \dots$ ). Natomiast strumienie magnetyczne w rdzeniach faz mnożnika, zawierają harmoniczne kolejności zerowej. W jednofazowych rdzeniach mnożnika, o zamkniętych drogach dla strumienia, harmoniczne te mogą osiągać znaczne wartości.

Na rysunku 4.22 przedstawiono zasilacz ozonatora z magnetycznym mnożnikiem częstotliwości, w którym regulacja napięcia wyjściowego odbywa się za pomocą zmiany impedancji  $Z_N$  włączonej w przewód neutralny mnożnika.



Rys. 4.22. Mnożnik magnetyczny jako zasilacz reaktora z wyładowaniami barierowymi

Projektując uzwojenia wtórne mnożnika, na napięcie pracy ozonatora, uzyskuje się w jednym urządzeniu podwyższenie częstotliwości pracy reaktora, regulację napięcia i jego podwyższenie. Ponadto, pojemnościowy charakter ozonatora sprawia, że zbędne stają się, wymagane w innych zastosowaniach mnożników, kondensatory do kompensacji stosunkowo dużej składowej biernej mocy na wejściu zasilacza. Jeśli zasilacz z rysunku 4.22 jest potrajaczem częstotliwości ( $m = 3$ ), to trzecia harmoniczna strumienia  $\Phi_{3h}$  przenosi moc z sieci do odbiornika, zaś pierwsza  $\Phi_{1h}$  stwarza warunki do generacji trzeciej.

Napięcie na zaciskach wtórnych uzwojeń potrajacza, połączonych w otwarty trójkąt, zawiera tylko harmoniczne podzielne przez 3 i jest praktycznie sinusoidalne, ponieważ kolejna, 9-ta harmoniczna, stanowi

zaledwie 1% pierwszej i może być pominięta. Wartość skuteczna napięcia wyjściowego w stanie jałowym potrajacza częstotliwości wyraża się poprzez:

$$U_{20} = 3U_{30h} = 3\sqrt{2}f_3z_2A_{Fe}B_{30}, \quad (4.9)$$

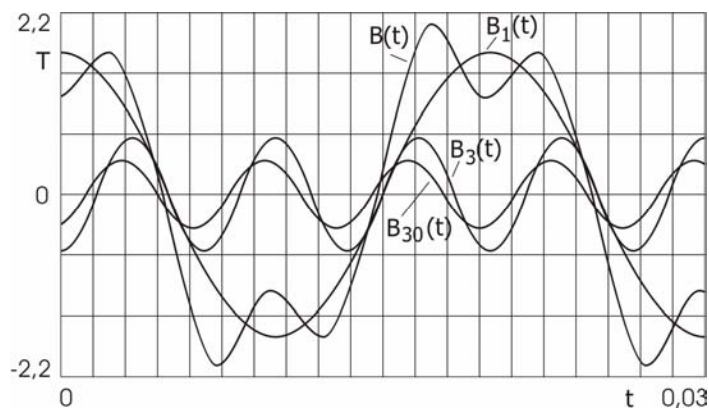
gdzie:  $U_{30h}$  – wartość skuteczna 3 harmonicznej napięcia indukowanej w fazie uzwojenia wtórnego mnożnika,  $B_{30}$  – amplituda 3 harmonicznej indukcji magnetycznej w stanie jałowym,  $A_{Fe}$  – przekrój rdzenia,  $f_3$  – częstotliwość wyjściowa,  $z_2$  – liczba zwojów uzwojenia wtórnego.

Wartość 3-ej harmonicznej indukcji magnetycznej  $B_{3h}$ , zależy od poziomu nasycenia rdzenia oraz od kształtu charakterystyki magnesowania  $B = f(H)$ . Dla rdzeni magnetycznych zbudowanych z blachy elektrotechnicznej, i dla pierwszej harmonicznej indukcji  $B_1$  z zakresu od 1,8 do 2,3 T, trzecia harmoniczna indukcji w stanie jałowym może być wyznaczona jako  $B_{30} = 0,21 B_1$ . W stanie obciążenia, prąd wtórny potrajacza indukuje dodatkowy strumień o potrojonej częstotliwości, który może osłabiać lub wzmacniać strumień indukowany przez prąd pierwotny. Wpływ pojemnościowego obciążenia, jakie prezentuje sobą reaktor z wyładowaniami barierowymi, na trzecią harmoniczną indukcji i przebieg wypadkowej indukcji  $B(t)$  w rdzeniu, przedstawia rysunek 4.23. Obciążenie i jego charakter wpływają zarówno na amplitudę jak i na fazę 3-ej harmonicznej indukcji w rdzeniu potrajacza co powoduje, że napięcie wtórne mnożnika magnetycznego zmienia się wraz charakterem obciążenia znacznie bardziej niż ma to miejsce w klasycznym transformatorze, w którym punkt pracy zależy tylko od wartości napięcia zasilającego (Rys. 4.24b). Wpływ charakteru obciążenia na charakterystykę zewnętrzną potrajacza można prześledzić przyjmując uproszczony schemat zastępczy, przedstawiony na rysunku 4.24a, w którym mnożnik zastąpiłoby rzeczywistym źródłem napięcia o sile elektromotorycznej  $U_{20}$  i reaktancji wewnętrznej  $X_{2i}$ . Zakładając, że reaktancja wewnętrzna mnożnika jest funkcją prądu obciążenia  $X_{2i} = f(I_2)$  oraz, że impedancja obciążenia

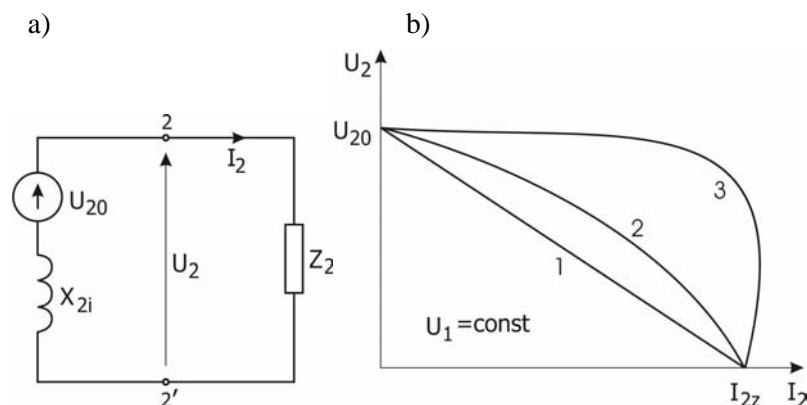
ma charakter rezystancyjno-pojemnościowy, według:  $\underline{Z} = R_2 - j X_2$ , charakterystyka prądowo-napięciowa  $U_2 = f(I_2)$  potrójca w stanie obciążenia może być wyrażona następująco:

$$U_2 = U_{20} \left\{ \sqrt{1 - \left( \frac{I_2}{I_{2z}} \right)^2} + \frac{I_2}{I_{2z}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \right\}, \quad (4.10)$$

gdzie:  $I_2$  – prąd obciążenia,  $I_{2z}$  – prąd zwarcia,  $\varphi$  – kąt fazowy obciążenia.



Rys. 4.23. Wpływ pojemnościowego obciążenia ( $\varphi = 0,5_{\text{poj}}$ ) na przebieg indukcji magnetycznej w rdzeniu  $B(t)$ :  $B_1(t)$  – pierwsza harmoniczna,  $B_{30}(t)$  – 3 harmoniczna w stanie jałowym,  $B_3(t)$  – 3 harmoniczna przy obciążeniu



Rys. 4.24. Schemat zastępczy zasilacza mnożnikowego przy obciążeniu (a), b) charakterystyki prądowo-napięciowe dla: 1 – obciążenie indukcyjne, 2 – rezystancyjne, 3 – pojemnościowe

Jak wynika z analizy (rys. 4.24b), dla pojemnościowego obciążenia, jakie prezentuje sobą reaktor plazmowy z wyładowaniami barierowymi, charakterystyka zewnętrzna (krzywa oznaczona cyfrą 3), jest sztywna w całym zakresie zmian prądu obciążenia. Ze względu na domagnesowujący wpływ obciążenia pojemnościowego, sztywna charakterystyka zewnętrzna zasilacza może być uzyskana przy niższych wartościach 1-ej harmonicznej indukcji magnetycznej, niż ma to miejsce przy obciążeniach indukcyjno-rezystancyjnych [88, 99]. Pociąga to za sobą również znacznie mniejszy pobór prądu pierwotnego i w konsekwencji mniejsze wymiary uzwojeń zasilacza. Można stwierdzić, że magnetyczne mnożniki częstotliwości stanowią dobre źródła zasilania dla reaktorów plazmowych z wyładowaniami barierowymi, co zostało zweryfikowane poprzez badania modeli laboratoryjnych takich zasilaczy oraz praktyczne wykorzystanie w układzie zasilania ozonatora zainstalowanego w Wytwórni Wód Mineralnych w Grodzisku Wielkopolskim [214].

#### **4.4. Układy przekształtnikowe**

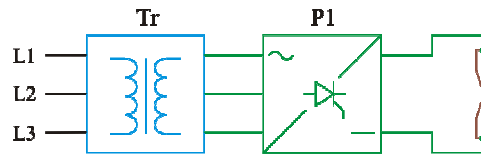
Zastosowanie statycznych półprzewodnikowych przetwornic napięcia i częstotliwości, do zasilania reaktorów plazmowych, jest coraz bardziej powszechne i obiecujące, ze względu na olbrzymi i wciąż dokonujący się postęp w dziedzinie technologii półprzewodnikowych, zwłaszcza dużych mocy.

Do zasilania łukowych reaktorów plazmowych stosuje się dwie podstawowe konstrukcje [215]:

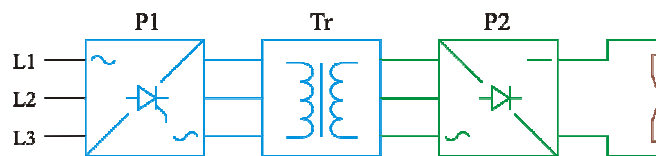
- z mostkiem sterowanym po stronie wtórnej transformatora dopasowującego (rys. 4.25a),
- ze sterownikiem prądu przemiennego po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego (rys. 4.25b).

Inne rozwiązania półprzewodnikowych układów zasilania urządzeń łukowych są modyfikacjami wyżej wymienionych konstrukcji.

a)

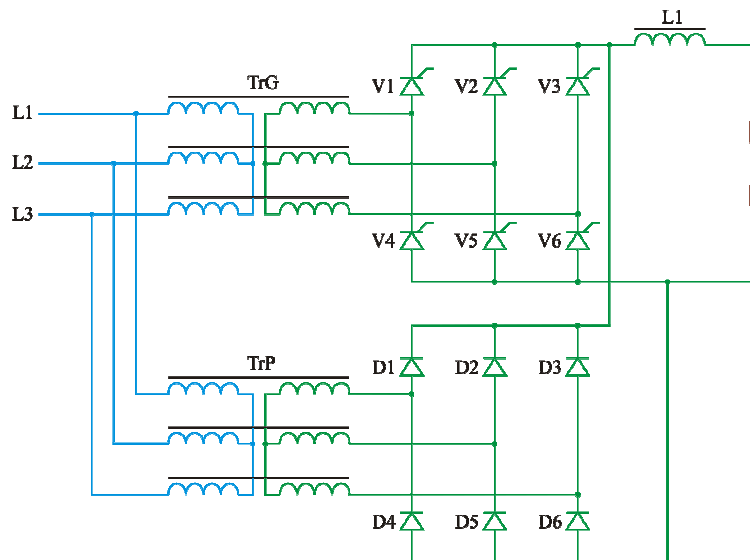


b)



Rys. 4.25. Podstawowe konstrukcje półprzewodnikowych układów zasilania reaktorów plazmy łukowej; a) układ z mostkiem sterowanym po stronie wtórnej transformatora, b) układ ze sterownikiem prądu przemiennego po stronie pierwotnej transformatora

Układy z mostkiem sterowanym po stronie wtórnej transformatora znalazły zastosowanie w przemyśle elektrotermicznym do zasilania pieców łukowych i plazmowo-łukowych. Przykładowe rozwiązanie takiej konstrukcji przedstawiono na rysunku 4.26.

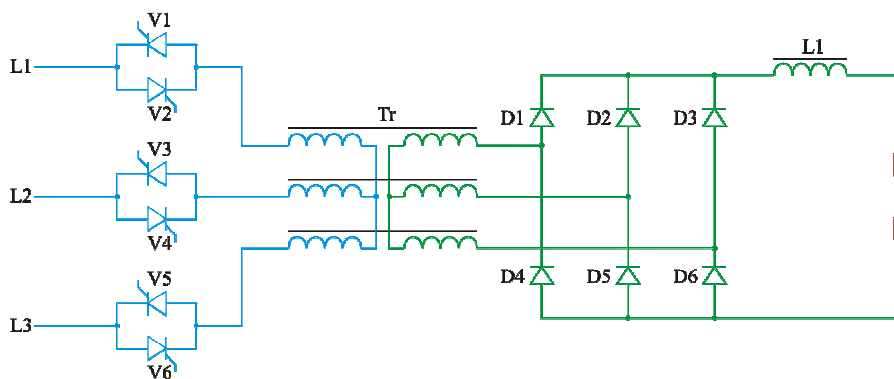


Rys. 4.26. Układ z mostkiem tyrystorowym i dodatkowym źródłem napięcia



Jest to układ złożony z dwóch transformatorów, w którym transformator główny zasila tyrystorowy mostek sześciopulsowy, będący elementem sterującym wartością prądu wyładowania łukowego. Dla ograniczenia indukcyjności w obwodzie z wyładowaniem, stosuje się dodatkowe źródło napięcia w postaci niesterowalnego sześciopulsowego mostka diodowego. Mostek ten zasilany jest z dodatkowego transformatora pomocniczego o małej mocy i tak dobranej reaktancji rozproszenia, by zapewnić intensywne opadanie charakterystyki zewnętrznej. Gdy prowadzony proces technologiczny wymaga wygładzonego prądu wyładowania łukowego, dodatkowo do obwodu wprowadza się dławik, jak to przedstawiono na rysunku 4.26.

Układ zasilania reaktora plazmy łukowej, w którym sterowanie procesem plazmowym i kształtowanie charakterystyki zewnętrznej odbywa się po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego przedstawia rysunek 4.27.

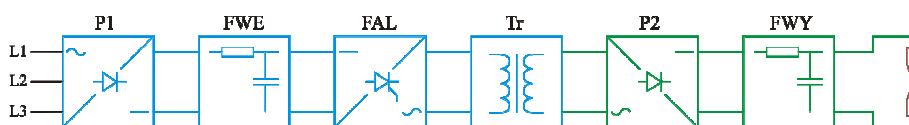


Rys. 4.27. Układ ze sterownikiem tyrystorowym po pierwotnej stronie transformatora

W tego typu układach, najczęściej we wszystkich trzech fazach, po stronie pierwotnej transformatora umieszczone są sterowniki tyrystorowe, zaś po stronie wtórnej znajduje się sześciopulsowy mostek diodowy i dławik zapewniający ciągłość prądu i jego wygładzenie. W celu zapewnienia minimalnego prądu wyładowania, w obwód po stronie pierwotnej,

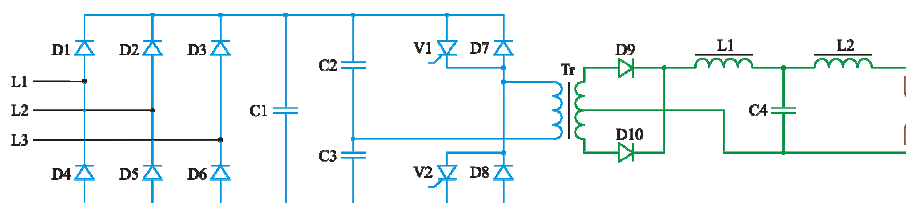
włącza się równolegle do sterowników dodatkowe dławiki a czasem stosuje się wielostopniowe połączenia tego typu, ograniczając w ten sposób pulsacje prądu wyładowania. Do podstawowych wad omówionych układów półprzewodnikowych zaliczyć należy przede wszystkim duże rozmiary, co istotnie ogranicza liczbę możliwych zastosowań. Wady tej pozbawione są półprzewodnikowe układy zasilania odbiorników łukowych z pośredniczącym obwodem podwyższonej częstotliwości. Rozwiązanie takie pozwala również na dokładniejszą regulację prądu wyładowania i polepsza dynamikę układu zasilania.

Wprowadzenie obwodu o podwyższonej częstotliwości umożliwia, przede wszystkim, zmniejszenie masy i objętości elementów indukcyjnych, tj. transformatora dopasowującego i dławika w obwodzie z wyładowaniem. Zwiększa się również sprawność urządzenia ze względu na mniejsze straty w miedzi transformatora. Schemat blokowy takiego układu przedstawia rysunek 4.28. Główne elementy układu to: prostownik, transformator podwyższający i falownik dający na wyjściu napięcie przemiennie o podwyższonej częstotliwości. W układach z falownikami stosuje się częstotliwości w granicach od 500 Hz do 20 kHz. Uzyskane z falownika napięcie, jest transformowane do wymaganej wartości i następnie kolejny raz prostowane.



Rys. 4.28. Schemat blokowy układu z pośredniczącym obwodem podwyższonej częstotliwości: P1 – prostownik wejściowy, FWE – filtr wejściowy, FAL – falownik, Tr – transformator, P2 – prostownik wyjściowy, FWY – filtr wyjściowy

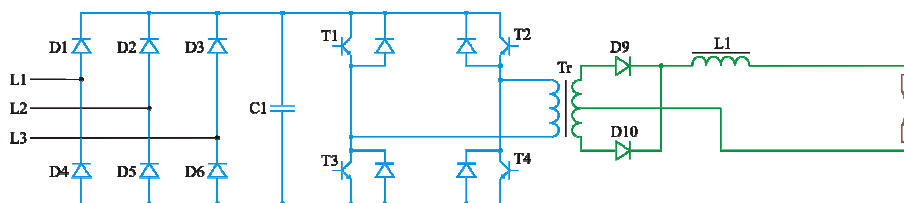
Na rysunku 4.29 przedstawiono obwód główny falownika szeregowego z diodami zwrotnymi, jaki znajduje zastosowanie w spawarkach do spawania ręcznego elektrodą otuloną i łukiem krytym.



Rys. 4.29. Schemat obwodu głównego zasilacza w układzie falownika prądu z diodami zwrotnymi

Zaletą układu z rys. 4.29 jest możliwość zwiększania prądu w obwodzie z łukiem przez równoległe łączenie kilku falowników. Odbywa się to jednak kosztem zwiększenia masy urządzenia i skomplikowaniem obwodu sterowania i regulacji. Istotną wadą układu, jest występowanie po stronie pierwotnej zasilacza obwodu rezonansowego, składającego się z transformatora i kondensatorów oraz duże wartości skuteczne prądu po stronie pierwotnej, wynikające ze stosowania transformatorów ze szczelną powietrzną.

Inne rozwiązanie układu zasilania z obwodem pośredniczącym o podwyższonej częstotliwości, wykorzystujące w swej konstrukcji falownik o konstrukcji fazowej, przedstawia rysunek 4.29. Napięcie wyjściowe tego falownika w niewielkim stopniu zależy od obciążenia, co jest szczególnie korzystne przy pracy reaktorów plazmowych z różnymi gazami roboczymi i przy różnej ich wydajności, w zależności od prowadzonego procesu technologicznego. Ponadto, zaletą układu jest lepsze wykorzystanie transformatora, w porównaniu z innymi układami półprzewodnikowymi, gdyż przenosi on głównie moc czynną. Gdy zawory energoelektroniczne układu wykonane są z tranzystorów, do sterowania i regulacji wykorzystuje się komparatory oraz regulatory prądu typu PI, co czyni układ mało skomplikowanym i niezawodnym.



Rys. 4.30. Układ zasilania z falownikiem o komutacji fazowej

Układy zasilania odbiorników łukowych z pośredniczącym obwodem o podwyższonej częstotliwości, mimo znacznego skomplikowania, znajdują zastosowanie, przede wszystkim, w technologiach związanych z napylaniem i natryskiwaniem plazmowym, głównie ze względu na małe rozmiary.

#### 4.5. Analiza mocy i sprawności wybranych transformatorowych układów zasilania reaktorów plazmowych

Elementy wyładowcze, omawianych w rozdziale 3 reaktorów plazmy nietermicznej z wyładowaniami barierowymi oraz ze ślizgającym się łukiem elektrycznym, są dla układu zasilania specyficznymi odbiornikami nieliniowymi. Obok mocy czynnej, związanej z zachodzącymi w nich procesami plazmo-chemicznymi i stratami, występuje w nich moc bierna odkształcenia  $D$ , a w reaktorze z wyładowaniami barierowymi także moc bierna przesunięcia  $Q$  o charakterze pojemnościowym.

Uproszczoną analizę strat mocy i porównanie układów zasilania, przeprowadzono dla ozonatora o mocy 160 kW, wydajności 10 kg  $O_3/h$  i koncentracji 18 g/m<sup>3</sup> (tabela 4.1) oraz dla reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem o mocy 50 kW (tabela 4.2). Na podstawie danych katalogowych elementów układów oszacowano występujące w nich straty mocy w warunkach pracy znamionowej i wyznaczono dla każdego układu moc czynną pobieraną z sieci i sprawność.

#### 4.5.1. Moc i sprawność wybranych układów zasilania reaktorów z wyładowaniami barierowymi

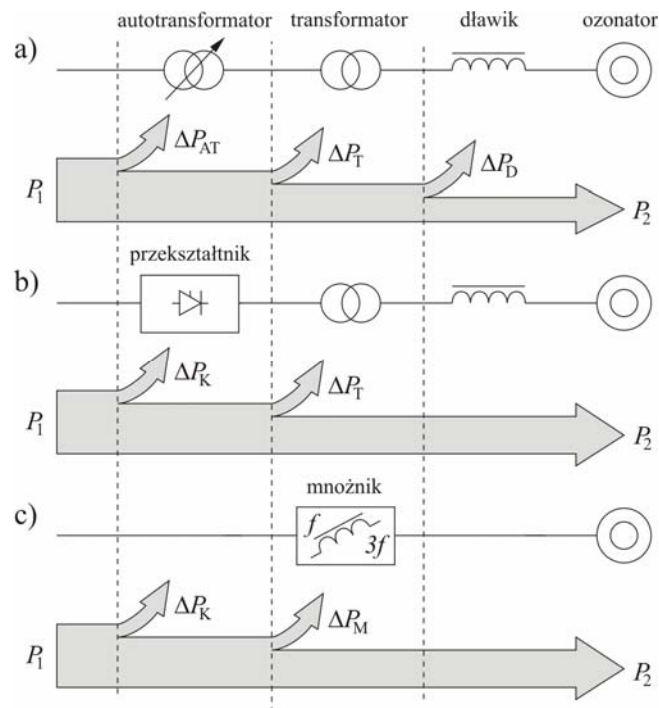
Moc czynna  $P$  ozonatora wynika z wymaganej ilości ozonu wytwarzanego przez generator, którą zapewnia się przez odpowiednią liczbę równolegle połączonych elementów wyładowczych. Moc pojedynczego elementu wyładowczego (rozdział 3.1.2), zależy od wymiarów, właściwości materiałów użytych do jego budowy oraz wartości napięcia i częstotliwości źródła zasilającego. Najczęściej stosowane w generatorach ozonu elementy o konstrukcji rurowej mają moc czynną rzędu 350 W i wydajność 60 g O<sub>3</sub>/kWh przy częstotliwości 50 Hz i około 800 W i 50 g/kWh przy 600 Hz, przy wytwarzaniu ozonu z powietrza. Liczba elementów wyładowczych w jednym generatorze może wynosić od 200 do 1000, a zatem moc czynna jednego generatora przemysłowego może wynosić od 50kW do 900 kW. Współczynnik mocy elementu wyładowczego zawiera się w granicach od 0,3÷0,8.

Analizę strat mocy przeprowadzono dla trzech układów zasilania, których schematy blokowe przedstawiono na rysunku 4.31:

- układu częstotliwości sieciowej 50 Hz, złożonego z transformatora, dławików i autotransformatora do regulacji napięcia,
- układu tyrystorowego pracującego przy częstotliwości 600 Hz,
- układu mnożnikowego 150 Hz (rozdział 4.4).

Aby zminimalizować straty mocy i wymiary elementów układu zasilania, kompensuje się moc bierną pojemnościową dławikami. Po skompensowaniu prądu pojemnościowego ozonatora współczynnik mocy zawiera się w granicach 0,8÷0,9 (mocy odkształcenia nie da się w prosty sposób skompensować), a to oznacza, że moc pozorna transformatora  $S_T$  w układzie zasilania, musi być większa od mocy czynnej  $P$  o 10÷20%. Transformator jest budowany na moc pozorną  $S$  i jego straty mocy  $\Delta P_T$ , są do niej proporcjonalne. Moc dławika kompensującego  $Q_D$ , jest bliska mocy czynnej  $Q_D = (0,7\div 1,2)P$ . Dławik jest także źródłem strat mocy czynnej,

których wartość jest tego samego rzędu co straty w transformatorze. Jeśli w układzie jest autotransformator regulacyjny, to jest on również źródłem strat  $\Delta P_{AT}$ .



Rys.4.31. Schematy blokowe analizowanych układów zasilania reaktorów z wyładowaniami barierowymi

W układach zasilania podwyższonej częstotliwości (układ przekształtnikowy), dławik i transformator są wymiarami geometrycznymi nieco mniejsze, ale całkowite straty mocy są wyższe niż w układzie częstotliwości sieciowej.

W układzie mnożnikowym występuje tylko jeden magnetyczny potrajacz częstotliwości o stratach zbliżonych do transformatora. Zakładając w układzie z rys. 4.31a pełną kompensację mocy biernej i szacując moc odkształcenia na poziomie 20% mocy czynnej ozonatora  $P_2$ , moc znamionowa transformatora wynosi 200 kVA. Transformator o takiej mocy i napięciach 30/0,4 kV ma sprawność 96%. Z uwagi na odkształcone

przebiegi napięcia i prądu straty mocy w transformatorze zasilającym są wyższe i przyjmujemy je równe 5%, co odpowiada 10 kW. Zakładając współczynnik mocy ozonatora równy  $\cos \phi = 0,6$ , moc pozorna ozonatora  $S_o$  wyniesie 270 kVA, a sumaryczna moc bierna  $Q_o$  i moc odkształcenia  $D_o$  ( $\sqrt{Q_o^2 + D_o^2}$ ) jest równa 210 kvar. Szacując moc odkształcenia na poziomie 20%  $P$ , tj. 32 kvar, moc bierna pojemnościowa ozonatora wyniesie 200 kvar i na taką moc musi być zaprojektowany dławik do kompensacji mocy biernej. Straty mocy w dławiku można więc określić na poziomie 6 kW (straty mocy w rdzeniu takie jak w transformatorze, a w uzwojeniach równe połowie strat transformatora o tej samej mocy nominalnej, zakładając stosunek strat w uzwojeniach do strat w rdzeniu jak 3:1). Moc autotransformatora  $S_{AT}$  zależy od zakresu regulacyjnego i została przyjęta jako  $0,8 S_T$  a straty mocy w autotransformatorze  $\Delta P_{AT} = 0,8 \Delta P_T$ . W układzie na podwyższoną częstotliwość (600 Hz) (rys. 4.31b), mimo pewnego zmniejszenia wymiarów elementów układu zasilania, przyjęto straty mocy wyższe o 10% od tych, jakie występują przy częstotliwości 50 Hz. W układzie z potrajaczem (rys. 4.31c), z uwagi na podwyższoną indukcję pracy i straty mocy w układzie regulacji, przyjęto sumaryczne straty mocy o 20% wyższe niż w transformatorze o tej samej mocy.

Z przedstawionych w tabeli 4.1 wyników analizy wynika, że największą sprawność ma układ z magnetycznym potrajaczem częstotliwości (mpc). Wysoka sprawność układu mnożnikowego wynika z ograniczenia liczby elementów układu zasilania, bowiem funkcje dławików i autotransformatora, elementów niezbędnych w pozostałych układach, są realizowane w mpc. Ponadto, układ nie wymaga kompensacji mocy biernej pojemnościowej, a trzykrotne podwyższenie częstotliwości roboczej pozwala obniżyć napięcie pracy ozonatora, przy zachowaniu tej samej wydajności i przy niezmiennych warunkach chłodzenia elektrod.

Tabela 4.1. Straty mocy w układach zasilania ozonatorów

Układ	Układ sieciowy 50 Hz			Układ tyrystorowy 600 Hz			Mnożnik 150 Hz		
	$S_n$ kVA	$\Delta P$ kW	$\Delta P$ %	$S_n$ kVA	$\Delta P$ kW	$\Delta P$ %	$S_n$ kVA	$\Delta P$ kW	$\Delta P$ %
Dławik	160	4,8	3,0	160	5,6	7,0	-	-	-
Transformator	200	10	6,2	200	11	6,8	200	11	6,8
Autotransformator	200	6	3,7	-	-	-	-	-	-
Przekształtnik tyrystorowy	-	-	-	200	8	5,0	-	-	-
Układ	200	20,8	13	200	24,6	15,5	200	11	6,8
Moc czynna ozonatora $P_2$	160 kW								
Moc czynna z sieci $P_1$	180,8 kW			184,6 kW			171,0 kW		
Sprawność $= P_2/P_1$	88,5%			86,7%			93,6%		

#### 4.5.2. Moc i sprawność wybranych układów zasilania reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

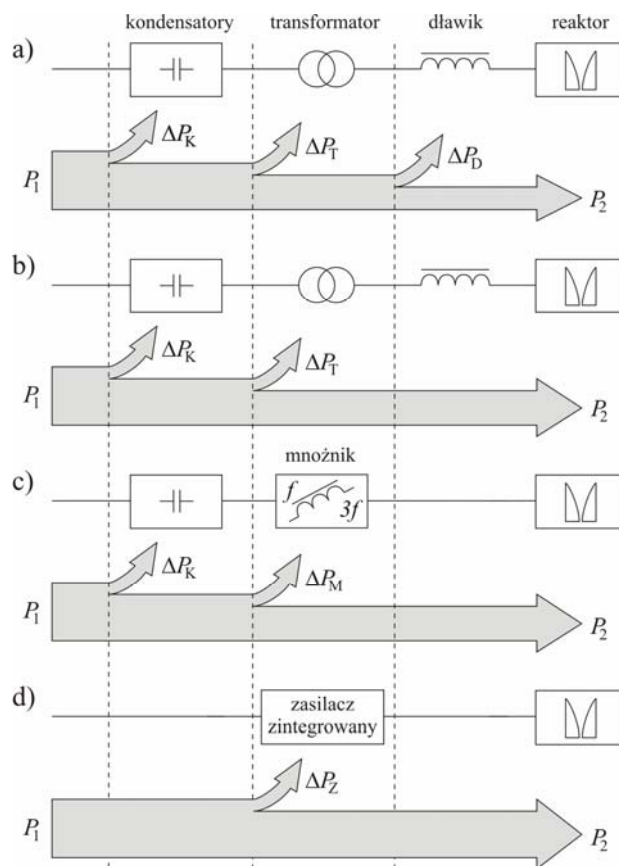
Analizę strat mocy w układach zasilania reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym można przeprowadzić w podobny sposób jak dla układów zasilania ozonatorów. Schematy blokowe analizowanych układów zasilania przedstawia rys. 4.32. Analizę przeprowadzono dla następujących czterech układów zasilania:

- układu z transformatorem i dławikami,
- układu z transformatorem rozproszeniowym,
- układu magnetycznego potrajacza częstotliwości,
- układu zintegrowanego (rozdział 4.3).

Reaktor ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym nie pobiera z sieci mocy biernej  $Q$ , natomiast występuje w nim moc odkształcenia  $D$ .



Współczynnik mocy, określony jako stosunek mocy czynnej do pozornej na zaciskach elektrod, wynosi od  $0,6 \div 0,8$ . Moc pozorna reaktora  $S$  jest zatem równa  $1,2$  do  $1,6$  mocy czynnej  $P$ , wymaganej w procesie plazmowym. W reaktorach bez układu zapłonowego, moc pozorna transformatora  $S_T$ , jest znacznie wyższa i wynosi  $5 \div 8 S$ , a moc dławików  $Q_L$  ograniczających prąd i kondensatorów  $Q_C$  kompensujących moc bierną tych dławików, jest równa  $0,8$  mocy transformatora  $S_T$  ( $Q_L = Q_C \approx 0,8 S_T \approx 7 S$ ). W układzie zintegrowanym moc transformatora  $S_T$ , jest równa mocy reaktora  $S$  i wynosi  $S_T = (1,3 \div 1,6) P$ . Przedstawione w tabeli 4.2 wyniki wskazują, że najmniejsze straty i największą sprawność ma układ zintegrowany.



Rys 4.32. Schematy blokowe układów zasilania reaktorów plazmy łukowej

Tabela 4.2. Straty mocy w układach zasilania reaktorów łukowych

Układ	Układ z transformatorem i dławikami			Układ z transformatorem rozproszonym			Układ z mnożnikiem 150 Hz			Układ zintegrowany		
	$S_n$ kVA	$\Delta P$ kW	$\Delta P$ %	$S_n$ kVA	$\Delta P$ kW	$\Delta P$ %	$S_n$ kVA	$\Delta P$ kW	$\Delta P$ %	$S_n$ kVA	$\Delta P$ kW	$\Delta P$ %
Kondensatory	360	3,6	1	240	2,4	1	160	1,6	1	-	-	-
Transformator	400	18	4,5	320	16	5	240	14,4	6	80	4,8	6
Dławik	360	11	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Układ	400	32,6	65,2	320	18,4	36,8	240	16	32	80	4,8	9,6
Moc reaktora $P_2$	50 kW											
Moc czynna z sieci $P_1$	82,6 kW			68,4 kW			66 kW			54,8 kW		
Sprawność $P_2 / P_1$	60,5%			73%			76%			91%		

Zmniejszenie strat w układzie uzyskuje się nie tylko przez eliminację dławików ograniczających prąd i kondensatorów kompensujących, ale przede wszystkim przez (5÷8)-krotne zmniejszenie mocy transformatora zasilającego elektrody robocze reaktora łukowego. Integracja w jednym układzie zasilania funkcji wymaganych przez reaktor plazmowy, pozwala obniżyć koszty oraz zwiększa jego niezawodność.

#### 4.6. Wybrane zagadnienia projektowania układów zasilania reaktorów plazmowych

Projektowanie zasilaczy elektromagnetycznych reaktorów plazmy wyładowań barierowych i ślizgającego się wyładowania łukowego sprowadza się w zasadzie do wyznaczania parametrów konstrukcyjnych transformatorów tworzących zasilacz, bądź w postaci mnożnika magnetycznego, rdzenia pięciokolumnowego, bądź jako układ zintegrowany czterech jednofazowych transformatorów. Praca tych specjalnych transformatorów polega na wykorzystaniu wyższych harmonicznym strumienia magnetycznego, które indukują napięcie robocze o podwyższonej częstotliwości (do zasilania reaktorów z wyładowaniami barierowymi, rozdział 4.3), albo napięcie zapłonu wyładowań, jak ma to miejsce w układzie zinte-

growanym (rozdział 4.2) i w układzie z transformatorem 5-kolumnowym (rozdział 4.2.1). W związku z tym, szczególnego znaczenia nabiera taki wybór materiału na rdzenie i poziomu indukcji magnetycznej, aby zapewnić odpowiednio wysoką wartość wyższych harmonicznym strumienia magnetycznego. Zawartość wyższych harmonicznym w strumieniu magnetycznym zależy nie tylko od nieliniowości charakterystyki magnesowania transformatorów zasilacza, ale w równym stopniu także od nieliniowych charakterystyk odbiornika. Obecność wysokiej częstotliwości obwodu zapłonowego, oraz harmonicznym indukowanym przez ten obwód, to następne powody, wpływające na odkształcenie krzywej strumienia magnetycznego oraz przebiegów napięć roboczych. Jak wynika z analiz i badań reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, których wyniki przedstawiono w rozdziale 3.3.1, materiał rdzenia transformatora może istotnie zmieniać przebiegi napięć w reaktorze i zdolność do przenoszenia przez zasilacz wyższych harmonicznym generowanym w reaktorze.

Materiał na rdzenie transformatorów decyduje w znacznej mierze o przetwarzaniu częstotliwości, przenoszeniu mocy, stratach i sprawności zasilacza, bowiem zjawiska zachodzące w rdzeniach i ich nieliniowość leżą u podstaw działania zasilaczy elektromagnetycznych dla urządzeń wyładowczych. Materiał rdzeniowy powinien sprostać wymaganiom pracy, przy znacznych indukcjach nasycenia obwodu magnetycznego, a kształt charakterystyki magnesowania i położenie punktu pracy wpływają na moc wyjściową i parametry eksploatacyjne zasilacza. Optymalny materiał na rdzenie transformatora powinien charakteryzować się dużym udziałem trzeciej harmonicznym indukcji  $B_{30}$ , niewielkim prądem magnesującym oraz niską stratnością. Kryteria te dobrze spełniają materiały o wysokim współczynniku prostokątności, określanej jako stosunek indukcji remanencji  $B_r$  do indukcji nasycenia  $B_s$ . Dla stosowanym powszechnie na rdzenie transformatorów mocy blach elektrotechnicznych, współczynnik prostokątności zawiera się granicach  $0,85 \div 0,9$ , co zapewnia

udział trzeciej harmonicznej indukcji wynoszący około 21% harmonicznej podstawowej. Coraz częściej na magnetowody transformatorów stosuje się materiały amorficzne (szkła metaliczne), które charakteryzują się krzywą magnesowania o dużej prostokątności i niskiej indukcji nasycenia. Umożliwia to pracę zasilacza przy niewielkich stratach i małym prądzie magnesującym. Obecnie materiały amorficzne są dostępne, a ich cena jest niewiele wyższa od konwencjonalnych materiałów magnetycznych.

Ważnym zagadnieniem przy projektowaniu zasilaczy transformatorowych dla reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym jest zapewnienie wymaganej reaktancji rozproszenia (zwarcia) która, jak wynika z dotychczasowych badań, w transformatorach zasilaczy zintegrowanych powinna wynosić 30÷40% [147, 214]. Podobne wartości reaktancji rozproszenia wymagane są w zasilaczach bazujących na transformatorze pięciokolumnowym [129]. Jest to wartość wyższa niż w klasycznych transformatorach energetycznych i niższa niż w zasilaczach urządzeń spawalniczych. Taką wartość reaktancji rozproszenia trudno uzyskać w konstrukcjach uzwojeń współosiowych, gdzie nie przekracza 15%, oraz w konstrukcji o uzwojeniach rozdzielonych, gdzie wynosi ponad 60% [221]. Reaktancję rozproszenia uzwojeń zasilających elektrody robocze kształtuje się poprzez odpowiednie rozmieszczenie względem siebie uzwojenia pierwotnego i wtórnego na kolumnach transformatora. Najwyższą wartość reaktancji rozproszenia uzyskuje się dla uzwojeń krążkowych. Gdy występuje jeden krążek uzwojenia pierwotnego i jeden krążek uzwojenia wtórnego, reaktancja zwarcia jest na tyle wysoka że, w konwencjonalnych transformatorach, powoduje niedopuszczalnie dużą stratę napięcia. Zmieniając liczbę krążków można zmieniać wartość reaktancji w szerokich granicach. W uzwojeniach współśrodkowych można również, w pewnym stopniu, wpływać na wartość reaktancji rozproszenia przez wprowadzenie asymetrii przestrzennej uzwojeń.

Pozostałe zagadnienia związane z projektowaniem transformatorów dla zasilaczy reaktorów plazmowych nie mają cech szczególnych i nie będą tutaj omawiane, a znajdują się w bogatej literaturze [212, 214, 219, 220÷224].

#### **4.7. Podsumowanie**

W układach zasilania łukowych reaktorów nietermicznej plazmy, wykorzystuje się specjalnej konstrukcji transformatory i układy przekształtnikowe. Układy transformatorowe – zintegrowany (rozd. 4.2), pięciokolumnowy (rozd. 4.2.1), i mnożnikowy (rozd. 4.3), o odpowiednio ukształtowanej charakterystyce zewnętrznej (reaktancji zwarcia), spełniają wszystkie wymagania urządzeń wyładowczych. Zapewniają one zapłon wyładowań, ich podtrzymanie po zapłonie i ograniczenie prądu elektrod, a jako zasilacze reaktorów z wyładowaniami barierowymi kompensują składową pojemnościową prądu reaktora, poprawiając współpracę reaktora plazmowego z siecią zasilającą. W układzie zintegrowanym zapłon wyładowania realizowany jest przez trzecią harmoniczną (150 Hz) napięcia, indukowaną na skutek nieliniowości transformatorów roboczych, zaś przenoszenie mocy odbywa się przez pierwszą harmoniczną głównego strumienia magnetycznego transformatorów roboczych. Dzięki integracji funkcji zapłonu, podtrzymania wyładowania i ograniczenia prądu elektrod w jednym urządzeniu, transformatory robocze mogą być projektowane na kilka- do kilkunastokrotnie niższe napięcia pracy (moce znamionowe) niż stosowane dotychczas. Takie rozwiązanie zapewnia stabilną pracę reaktora plazmowego, krótkie przerwy bezprądowe, pozwala zmniejszyć liczbę elementów stosowanych w tradycyjnych zasilaczach transformatorowych, a tym samym ma niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

Układy przekształtnikowe, stosowane powszechnie w celach napędowych, odpowiednio zaprojektowane jako zasilacze urządzeń wyładow-

czych mają wiele zalet i właściwości nieosiągalnych w zasilaczach transformatorowych. Główną zaletą takich zasilaczy jest możliwość regulacji napięć, prądów i mocy w szerokim zakresie, niezbędnym dla poprawnej pracy reaktora plazmowego. Obecnie, układy zasilania bazujące na tranzystorach IGBT, budowane są na małe i średnie moce, rzędu kilkuset kilowatów i częstotliwości do 20kHz, zaś układy bazujące na transformatorach MOSFET, mają moce rzędu kilku kilowatów i częstotliwości przełączania do kilkuset kiloherców [218]. Takie wartości mocy są wystarczające z punktu widzenia realizacji zasilaczy dla reaktorów nietermicznej plazmy o dobrych właściwościach regulacyjnych. Budowany w Laboratorium Technologii Plazmowych Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej zasilacz energoelektroniczny AC/DC/AC w układzie otwartym oraz wieloelektrodowy reaktor plazmowy ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym o zmiennej, regulowanej geometrii elektrod, pozwoli na zbadanie właściwości takich systemów oraz dobór parametrów reaktorów plazmowych i ich zasilaczy dostosowanych do potrzeb procesów plazmo-chemicznych.

## **5. MODELOWANIE MATEMATYCZNE REAKTORÓW ZE ŚLIZGAJĄCYM SIĘ WYŁADOWANIEM ŁUKOWYM**

Teoria i praktyka modelowania matematycznego wyładowań elektrycznych, jest niemal równie długa jak ich przemysłowe wykorzystanie. Cały ubiegły wiek poświęcony był modelowaniu różnych zjawisk związanych z wyładowaniami łukowymi i zaowocował wieloma modelami, których użyteczność praktycznie zweryfikowano w badaniach dotyczących teorii zwarć i procesów łączeniowych, przy budowie komór gaszeniowych wyłączników prądowych, projektowaniu pieców łukowych i plazmotronów dla zastosowań w metalurgii i obróbce powierzchniowej [225÷231]. Podstawowym problemem w badaniach obwodów z komutacją, jest gaszenie wyładowania łukowego. Modele wyładowań łukowych dla tych celów są tak definiowane, aby poprawnie zbadać zjawiska zachodzące w pobliżu przejścia prądu przez zero – miejscu naturalnego gaszenia łuku. Pozwalają one wyciągnąć wnioski odnośnie doboru geometrii oraz parametrów komór wyłączników prądowych i tak je zaprojektować, aby gaszenie łuku następowało przy pierwszym przejściu prądu przez zero [228, 233].

Głównym celem modelowania wyładowań łukowych w reaktorach plazmowych jest taki dobór ich parametrów, oraz charakterystyk układu zasilającego, aby zapewnić nieprzerwane stabilne wyładowanie łukowe nierównowagowe, zapewniając jednocześnie wysoką wydajność i sprawność procesów plazmochemicznych. Zatem, w zależności od zastosowania i rodzaju wyładowań łukowych, cele ich modelowania matematycznego mogą być całkowicie przeciwstawne.

Zjawiska towarzyszące wyładowaniom łukowym, wykorzystywanym w technikach plazmowych, są niezwykle złożone a ich analiza wymaga wyznaczenia rozkładu pól elektromagnetycznego i temperaturowego, ich wzajemnych sprzężeń oraz rozwiązania równań przepływu energii, ładunku i masy. Nieliniowy charakter zjawisk w wyładowaniu łukowym, konieczność uwzględnienia i powiązania ze sobą fizycznych parametrów

zjonizowanego gazu, warunków chłodzenia łuku i elektrycznych parametrów układu zasilania zawsze zmuszają, przy konstruowaniu modelu matematycznego, do przyjmowania znacznych założeń upraszczających i często wymagają wyznaczanych empirycznie charakterystyk wyładowania. Model ślizgającego się wyładowania łukowego, którego parametry znacznie różnią się od klasycznego łuku elektrycznego, powinien uwzględnić kilkunastokrotny wzrost długości kolumny i objętości wyładowania, jego zapłon i cykliczną pracę reaktora. Ważnym zagadnieniem jest zapewnienie warunków nierównowagowych generowanej plazmy, co jest związane z rozkładem temperatury w przestrzeni wyładowczej reaktora oraz określeniem energii (temperatury) cząstek plazmy, a zwłaszcza elektronów, których energie w plazmie nierównowagowej są znacznie wyższe niż pozostałych cząstek plazmy. Zjawiska te są trudne do diagnostyki i wymagają specjalnych metod i urządzeń. Modelowanie matematyczne i numeryczne tych zjawisk jest alternatywą dla kosztownych badań eksperymentalnych.

Poniżej przedstawiono klasyfikację i przegląd modeli matematycznych wyładowań łukowych, zarówno deterministycznych jak i stochastycznych. Zwrócono szczególną uwagę na możliwość zastosowania omawianych modeli do opisu zjawisk w ślizgającym się wyładowaniu łukowych. Podano wybrane wyniki modelowania numerycznego ślizgającego się wyładowania łukowego, w którym wykorzystano zmodyfikowane modele zaciskowe, zaproponowane w pracach [142, 144]. Wyniki modelowania porównano z wybranymi wynikami badań eksperymentalnych. Przedstawiono także wyniki analizy numerycznej rozkładu temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.



## 5.1. Przegląd modeli matematycznych wyładowań łukowych

W zależności od celu modelowania i rodzaju zjawisk, które zamierzamy odwzorować w badanym procesie plazmowym, modele wyładowań łukowych można podzielić na: deterministyczne i stochastyczne, statyczne i dynamiczne, kanałowe i zaciskowe.

Podstawą do formułowania wszystkich modeli są równania hydrodynamiki nagrzewanego gazu, związane z wydzieloną przez wyładowanie energią elektryczną, oraz mechanizmy wymiany tej energii z otoczeniem. Wzrost temperatury i ciśnienia gazu, w którym zachodzą wyładowania, wpływają na zmienność procesów dysocjacji i jonizacji, a to oddziałuje z kolei na wartość parametrów elektrycznych i hydrodynamicznych obszaru plazmy wyładowania łukowego.

Pierwsze modele łuku zostały zaproponowane już na początku dwudziestego wieku. Można tu wymienić zaciskowy model empiryczny łuku elektrycznego, płonącego swobodnie między elektrodami węglowymi, podany przez Hertę Ayrton [230], w postaci dynamicznej charakterystyki prądowo-napięciowej uwzględniającej długość kolumny wyładowania.

Często wprowadza się podział modeli matematycznych na dwie zasadnicze grupy [225]:

- modele kanałowe, zwane również matematyczno-fizycznymi,
- modele zaciskowe, zwane modelami adaptatywnymi.

Za pomocą modeli kanałowych możemy obliczyć parametry miejscowe plazmy łuku i jej otoczenia (temperatura, ciśnienie, prędkość przepływu gazu) oraz dobrać najbardziej pożądane kształty komór w łącznikach i geometrie elektrod reaktorów plazmowych.

Poniżej wymieniono najczęściej stosowane modele kanałowe z krótkim opisem ich zastosowań:

- opracowany przez W. Hermanna, U. Kogelschatza, R. Ragallera i E. Schadego [229], w którym założono, że parametry elektryczne i hydrodynamiczne zmieniają się zarówno wzdłuż osi łuku  $z$ , jak i pro-

mienia  $r$ . Wykorzystywano go do obliczenia prądów połukowych w funkcji czasu, dla różnej stromości napięcia powrotnego i gęstości mocy wydzielanej i oddawanej z kolumny łukowej w funkcji promienia;

- opracowany przez B. W. Swansona, R. M. Roida oraz T. E. Browna [231], zakładający, że o odbiorze energii z łuku decydują zjawiska w warstwie granicznej pomiędzy łukiem a chłodnym gazem. Pozwala, między innymi, określić średnicę łuku w okresie zera prądu, obliczyć różne parametry łuku, przebiegi prądu połukowego w funkcji stromości napięcia powrotnego;
- podany przez J. J. Lowkiego, H. C. Ludwiga, D. T. Tumę oraz F. R. El-Akkariego [228] określany jest jako model matematyczny łuku łączeniowego stabilizowanego przez konwekcję. Wyjściowym równaniem do formułowania jego parametrów, jest zasada zachowania energii odniesiona do kolumny łuku. W omawianych równaniach przyjmuje się, że temperatura łuku jest stała wzdłuż promienia, energia promieniowania na jednostkę objętości, przy danym ciśnieniu, zależy tylko od temperatury, natomiast nie zależy od promienia łuku, liczba Macha, w obszarze plazmy łuku, jest równa liczbie Macha dla otaczającego łuk zimnego gazu i zależy tylko od kształtu dyszy, a energia kinetyczna gazu jest pomijalnie mała w stosunku do jego entalpii;
- modele opracowane przez M. D. Cowleya i S. K. Chana [227], M.T. C. Fanga i D. Brannena [232], Z. Cioka i Z. Pochankego [226]. W pracach tych autorów wyjściowymi są zawsze ogólne równania łuku. Różnice dotyczą albo założeń upraszczających albo sposobu rozwiązania równań.

W modelach zaciskowych zjawiska fizyczne zachodzące w łuku są sprowadzone do zastępczego dwójnika elektrycznego o nieliniowej zależności prądu i napięcia. Za ich pomocą liczymy przebiegi prądów, napięć, mocy i konduktancji w obwodach zasilania reaktorów plazmowych.

Przełomem w dziedzinie modelowania matematycznego łuku elektrycznego były modele zaciskowe Mayra i Cassiego które, modyfikowane następnie przez wielu autorów, pozwoliły opisać konduktancję kolumny wyładowania łukowego uwzględniającą mechanizmy wymiany energii z otoczeniem, konduktywność plazmy i jej zmiany wraz z temperaturą oraz termiczną stałą czasową.

Równanie Mayra łuku dynamicznego zakłada zmienną rezystywność kolumny łukowej i jej energii w jednostce objętości oraz jej powierzchniowe chłodzenie, przy czym moc odbierana z jednostki długości kolumny łukowej ma stałą wartość, a jej średnica nie zmienia się wraz ze zmianą prądu. W równaniu Cassiego pomijana jest bezwładność procesów jonizacyjnych oraz zjawiska przyelektrodowe, zakłada się, że w łuku występuje tylko jonizacja cieplna a temperatura, rezystywność i energia są stałe w czasie i przestrzeni. W przeciwieństwie do modelu Mayr'a, kolumna wyładowania w modelu Cassie'go chłodzona jest wewnątrzowo, a jej średnica zależy od wartości prądu.

Inne modele zaciskowe łuku łączeniowego publikowane były w pracach T. E. Browne, J. Urbaneca, W. Riedera, J. Schwartza i stanowiły próby połączenia modelu Mayra i Cassiego w jednym równaniu, uzależnienia modelu dodatkowo od napięcia łuku oraz uwzględnienia stochastycznej zależności stałej czasowej i mocy odbieranej z łuku w funkcji jego przewodności [142].

Osobne badania dotyczą modeli stochastycznych łuku oraz wykorzystania teorii chaosu, zwłaszcza, gdy interesują nas właściwości dynamiczne i stabilność układów z wyładowaniami łukowymi. Wyznaczona za pomocą modeli deterministycznych konduktancja wyładowania łukowego, odpowiada jego uśrednionym charakterystykom i nie uwzględnia małych, pojawiających się wokół wartości średniej, zmian konduktancji. Mogą one powodować, na przykład w wyłącznikach prądowych, inne warunki wyłączania, zwłaszcza, gdy będą się pojawiać w pobliżu przejścia prądu wyładowania przez zero.

Jak wskazują badania, stochastyczne zachowanie wyładowania łukowego opisuje, w sposób wystarczająco dokładny, proces autoregresji trzeciego rzędu, charakteryzujący tzw. procesy Markowa [233]. Aby zdefiniować model stochastyczny wyładowania łukowego i określić jego parametry, koniecznym jest przeprowadzenie wielu eksperymentów, z których można wybrać niezbędne informacje o zmianach konduktancji wyładowania.

Badania nad drganiami chaotycznymi zachodzącymi w plazmie wyładowań elektrycznych w gazach [234] dowiodły, że w napięciu wyładowania łukowego, zachodzącego w warunkach ciśnienia atmosferycznego, występują zaburzenia wskazujące na jego chaotyczne zachowanie. Zatem, w badaniu dynamiki i stabilności układów z wyładowaniami elektrycznymi wykorzystuje się standardowe narzędzia analizy układów chaotycznych takie jak: badanie trajektorii fazowych, analiza spektralna, zastosowanie wykładników Lapunova. W tym zakresie badania nad wyładowaniami łukowymi przy ciśnieniu atmosferycznym nie są zbyt liczne, w przeciwieństwie do wyładowań w gazach przy niskim ciśnieniu, gdzie dowiedziono istnienia procesów chaotycznych [235, 236].

W reaktorach plazmy ślizgającego się wyładowania łukowego dążymy do osiągnięcia warunków nierównowagi termodynamicznej, typowych dla wyładowań zachodzących przy niskim ciśnieniu, takich jak wyładowania jarzeniowe. Charakterystyki wyładowań ze ślizgającym się łukiem zależą od wiele parametrów (geometria elektrod, właściwości fizyczne gazu roboczego, jego prędkość i skład chemiczny, wartość prądu i napięcia, impedancja układu zasilającego). Zastosowanie metod analizy bazujących na teorii chaosu powinno dostarczyć wielu, nieosiągalnych innymi metodami, informacji o zachowaniu się układu i jego czułości na zmiany tych parametrów.

## 5.2. Modelowanie ślizgającego się wyładowania łukowego

Analizę numeryczną reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym przeprowadzono wykorzystując dwa znane z literatury modele wyładowań łukowych: dynamiczną charakterystykę prądowo-napięciową oraz równania nieliniowej konduktancji wyładowań łukowych, które po modyfikacjach uwzględniających specyfikę tych wyładowań, rozwiązano numerycznie w programie MathCAD oraz wykorzystując pakiet oprogramowania Microsim PSPICE [142, 144, 146, 147].

Zależność na dynamiczną charakterystykę prądowo-napięciową wyładowania łukowego, uwzględniająca jego długość, podaną po raz pierwszy przez Hertę Ayrton [230], przedstawia poniższe równanie:

$$u_l(t) = A + B \cdot l_l(t) + \frac{C + D \cdot l_l(t)}{i(t)} \quad (5.1)$$

w którym:  $A$ ,  $B$ ,  $C$  i  $D$  to stałe wyznaczone eksperymentalnie,  $l_l(t)$  – długość wyładowania,  $i(t)$  – prąd łuku.

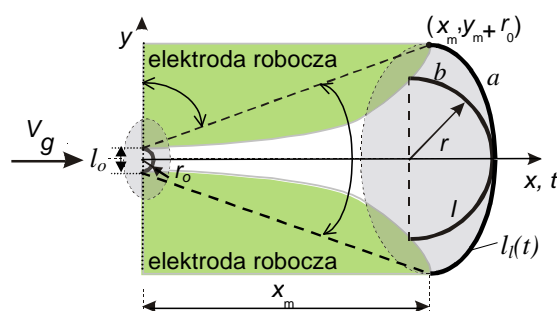
W zależności (5.1) długość kolumny wyładowania jest stała i takie założenie dla łuku płonącego swobodnie między elektrodami o stałym odstępem jest uzasadnione. Długość ślizgającego się wyładowania łukowego wzrasta kilkunastokrotnie w czasie cyklu pracy, w stosunku do odległości elektrod w miejscu zapłonu, i takie założenie byłoby zbyt dużym uproszczeniem. Zależność (5.1) zmodyfikowano uzależniając długość wyładowania w miejscu gaśnięcia od kąta rozchylenia elektrod, prędkości przepływu gazu  $v_g$  i czasu  $t$ , według:

$$l_l(t) = l_o + v_g \cdot t, \quad (5.2)$$

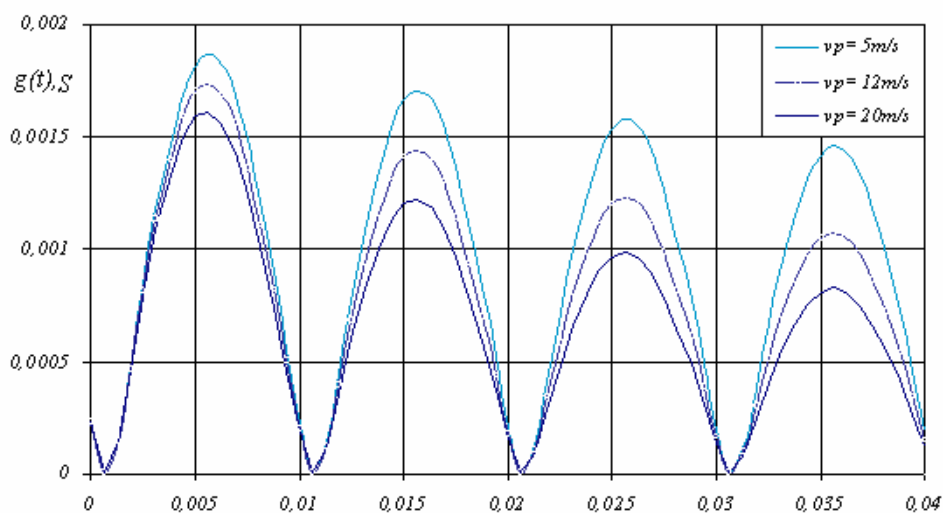
gdzie:  $l_o$  – początkowa odległość elektrod w miejscu zapłonu wyładowania.

Założono, zatem, że prędkość wyładowania jest równa prędkości gazu, a kolumna ma kształt części okręgu opartego na kącie rozchylenia elektrod (krzywa  $a$  na rys. 5.1).

Wybrane wyniki modelowania matematycznego ślizgającego się wyładowania zasilanego z rzeczywistego źródła napięcia sinusoidalnego w programie MathCAD, przedstawiono na rysunkach 5.2 i 5.3. Stwierdzono, że zależność na charakterystykę prądowo-napięciową wyładowania łukowego podana przez Ayrton, może dobrze odwzorowywać jakościowe przebiegi prądów i napięć w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

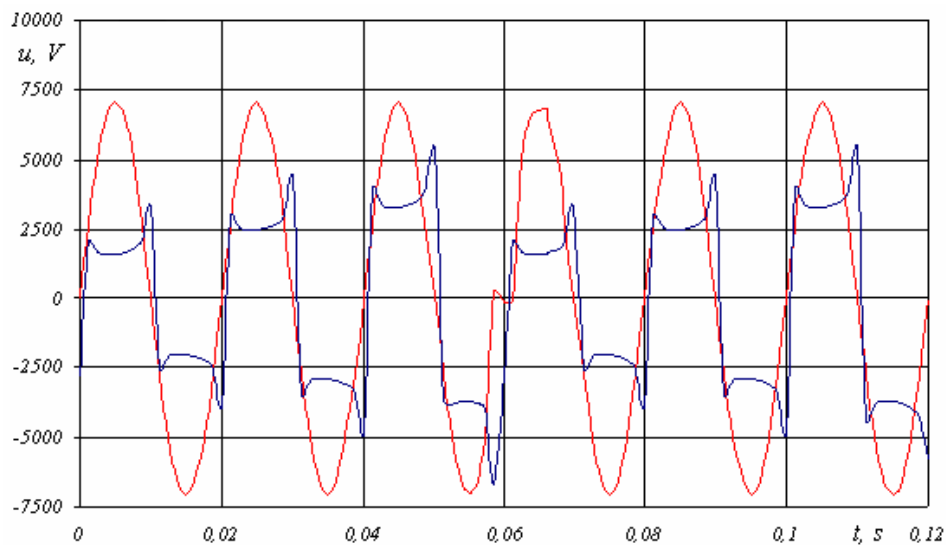


Rys. 5.1. Geometria elektrod z założonym kształtem kolumny ślizgającego się wyładowania łukowego:  $a$  – łuk oparty na kącie rozchylenia elektrod,  $b$  – kolumna w kształcie półokręgu



Rys. 5.2. Konduktancja wyładowania w funkcji czasu dla 3 prędkości gazu

Główne ograniczenia modelu związane są z koniecznością eksperymentalnego wyznaczania stałych w równaniu (5.1), zatem wyniki analiz dotyczą reaktorów o danej geometrii i nie mogą być uogólniane dla całej klasy reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.



Rys. 5.3. Prąd i napięcie wyładowania w kolejnych cyklach pracy reaktora

Sprawdzono także przydatność modeli zaciskowych Mayra i Cassiego do modelowania ślizgającego się łuku elektrycznego [140÷142]. Powód podjęcia próby przystosowania wymienionych modeli zaciskowych do analizy reaktora ze ślizgającym się łukiem wynika z prostego matematycznego opisu dynamiki wyładowania łukowego, oraz wielokrotnej weryfikacji tych modeli w modelowaniu obwodów elektrycznych z wyłącznikami prądu. Charakterystyki konduktancji łuku dynamicznego podane przez Mayr'a i Cassie'go przedstawiają równania (5.3) i (5.4):

$$\frac{dg(t)}{dt} + \frac{1}{M} g(t) = \frac{1}{M P_0} i^2(t), \quad (5.3)$$

$$\frac{dg^2(t)}{dt} + \frac{2}{c} g^2(t) = \frac{2}{c U_{st}^2} i^2(t), \quad (5.4)$$

w których :

$g(t)$  – konduktancja chwilowa kolumny łukowej,

$i(t)$  – natężenie prądu ,

$M$  – stała czasowa łuku przy założeniach Mayr'a,

$C$  – stała czasowa łuku przy założeniach Cassie'go,

$U_{st}$  – napięcie łuku w warunkach ustalonych,

$P_o$  – moc oddawana z jednostki długości kolumny łukowej.

Główne trudności zastosowania równań zaciskowych Mayr'a i Cassie'go, przy modelowaniu ślizgającego się wyładowania łukowego, stanowią: problem uwzględnienia elektrycznego zapłonu wyładowania, niepoprawne odwzorowanie charakterystyki prądowo-napięciowej w zakresie niewielkich wartości prądu, rzędu kilku amperów, oraz trudności w modelowaniu cyklicznej pracy reaktora [144]. Aby pokonać powyższe trudności, model matematyczny ślizgającego się wyładowania łukowego powinien spełniać podstawowe zależności energetyczne postulowane przez Mayr'a i Cassie'go, a mianowicie:

- mieć odpowiednie właściwości dynamiczne,
- dobrze przybliżać rzeczywisty przebieg statycznej charakterystyki prądowo-napięciowej wyładowania w zakresie prądów o stosunkowo niewielkich wartościach, tak jak ma to miejsce w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym,
- pozwalać zamodelować zapłon napięciowy wyładowania w zimnej przestrzeni międzyelektrodowej,
- uwzględniać cykliczność wyładowania i zmienność w czasie jego parametrów.

Nieliniową konduktancję łuku zamodelowano w programie PSPICE, wykorzystując definiowane przez użytkownika bloki modelowania analogowego. Technika ABM (z ang. analog behavioral modeling) pozwala na elastyczny opis elementów obwodu elektrycznego, poprzez podanie funkcji lub tablicy wartości sygnału wyjściowego w zależności od sygnałów



wejściowych. Zasada ta realizowana jest przy użyciu sterowanych źródeł napięcia i prądu oraz elementów układów sterowania.

Rozwiązaniem równań Mayr'a i Cassie'go, danych wzorami (5.3) i (5.4), są zależności na chwilową konduktancję nieliniową według:

$$g(t) = g_0 \cdot e^{\frac{1}{M} \int \left( \frac{u(t) \cdot i(t)}{P_0} - 1 \right) dt}, \quad (5.5)$$

$$g(t) = g_0 \cdot e^{\frac{1}{c} \int \left( \frac{u^2(t)}{U_{st}^2} - 1 \right) dt}, \quad (5.6)$$

gdzie:  $g_0$  – konduktancja wyładowania w miejscu zapłonu (najmniejszego odstępów elektrod), a bloki ABM realizujące obie konduktancje przedstawia rys. 5.4.

Zmodyfikowana zależność na konduktancję chwilową ślizgającego się wyładowania łukowego ma następującą postać [142]:

$$g(t) = g_0 \cdot e^{\int_0^{w(t)} \frac{1}{(g)} \left( \frac{p(t)}{P_0(g,t)} - 1 \right) dt} \quad (5.7)$$

gdzie:

$$w(t) = - \int_0^{t_z} \frac{1}{(g)} \left( \frac{p(t)}{P_0(g,t)} - 1 \right) dt, \quad (5.8)$$

$$\text{przy czym: } (g) = h \cdot g^j(t), \quad (5.9)$$

$p(t)$  – moc chwilowa odbierana z jednostki długości kolumny łukowej,

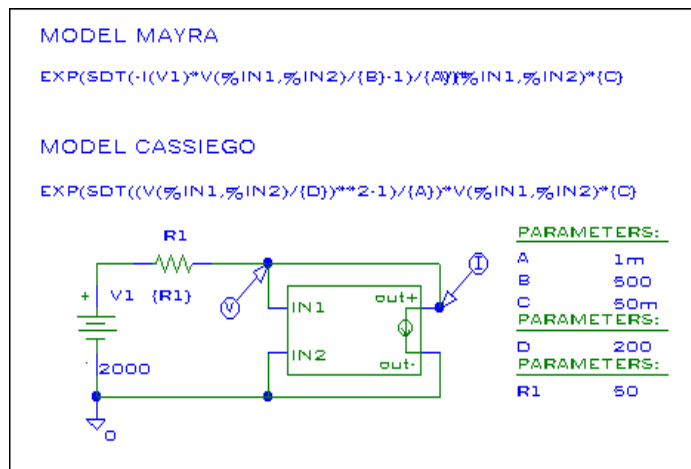
$$P_0(g) = a \cdot g(t) + c, \quad (5.10)$$

oraz:

$$a(t) = a_0 \cdot l^2(t - t_z), \quad (5.11)$$

$$c(t) = c_0 \cdot l(t - t_z), \quad (5.12)$$

w których:  $l(t)$  – zmienna w czasie długość wyładowania,  $t_z$  – czas odpowiadający chwili zapłonu wyładowania,  $h, j, a, a_0, c, c_0$  – stałe wyznaczone empirycznie.



Rys. 5.4. Bloki ABM realizujące równania Mayr'a i Cassie'go łuku elektrycznego [142]

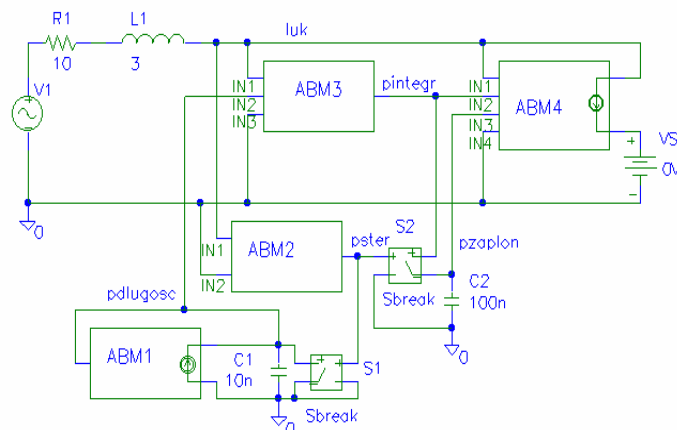
W stosunku do modeli zaciskowych Mayr'a i Cassie'go, w zaproponowanym modelu wielkość  $\tau$ , zwana stałą czasową, nie jest stała a zależy od konduktancji chwilowej wyładowania łukowego, według zależności (5.9). Elektryczny zapłon wyładowania realizowany jest w modelu za pomocą funkcji  $w(t)$  danej równaniem (5.8), zaś gęstość mocy odbieranej z kolumny łukowej  $P_0$  (5.10) jest liniową funkcją konduktancji chwilowej  $g(t)$ , przy czym współczynniki  $a$  i  $c$ , dane zależnościami (5.11) i (5.12), są funkcjami czasu zapłonu  $t_z$  oraz długości wyładowania  $l$ .

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że kolumna wyładowania ma kształt półokręgu, tak jak to przedstawia rys. 5.1 – krzywa  $b$ , a wyładowanie zasilane jest z rzeczywistego źródła napięcia sinusoidalnego  $V1$  o rezystancji wewnętrznej  $R1$  (rys. 5.4). Realizacja modelu ślizgającego się wyładowania łukowego za pomocą bloków ABM, według zmodyfikowanego równania danego zależnością (5.7), jest przedstawiona na rysunku 5.5.

Bloki ABM, ze schematu przedstawionego na rysunku 5.5, realizują następujące funkcje:

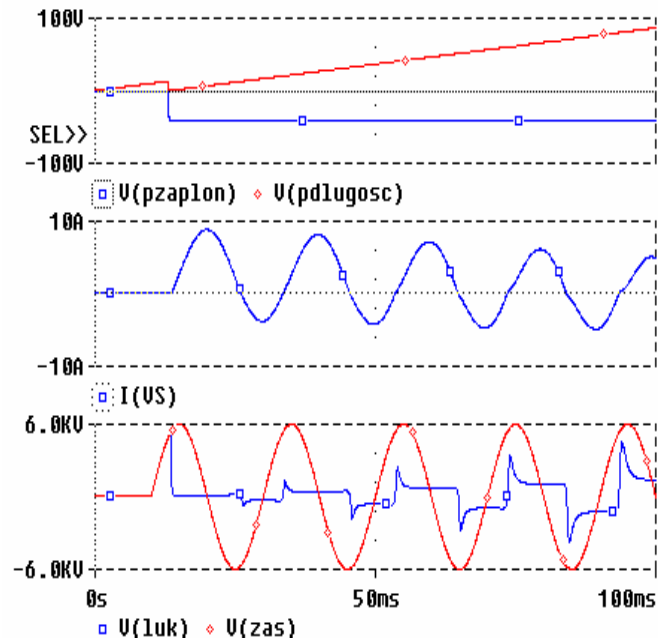
- elementy ABM3 i ABM4 są odpowiedzialne za realizację nieliniowej konduktancji,
- blok ABM2 wraz z wyłącznikiem sterowanym napięciowo S2 i kondensatorem C2, służą do generowania funkcji  $w(t)$  realizującej zapłon napięciowy,
- element ABM1, wyłącznik S1 i kondensator C1, modelują zmiany odbioru energii z kolumny wyładowania i jej długości w czasie cyklu pracy reaktora.

Symulacje numeryczne prowadzone były za pomocą analizy typu TRANSIENT, a ich wyniki przedstawiono w postaci chwilowych przebiegów prądu i napięcia wyładowania. Przeprowadzono także eksperymentalną weryfikację wyników analizy numerycznej na modelu reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

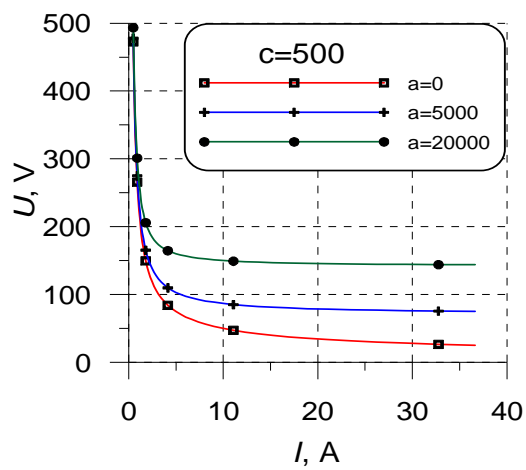


Rys. 5.5. Model ślizgającego się wyładowania łukowego [142]

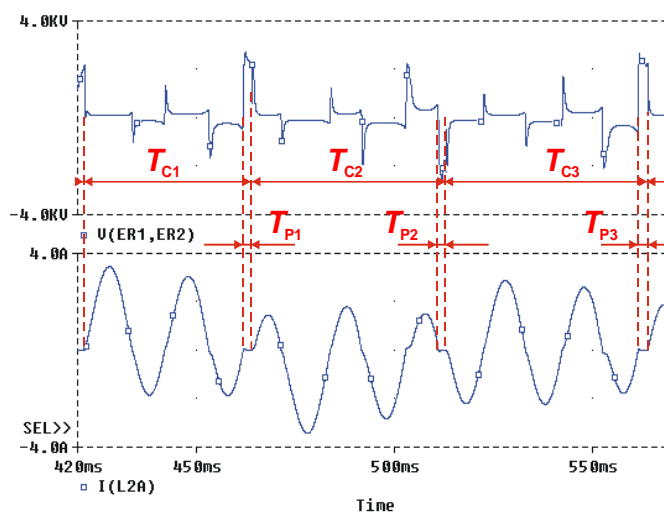
Przebiegi napięcia i prądu wyładowania oraz charakterystyki statyczne, uzyskane podczas analizy numerycznej, przedstawiono na rysunkach 5.6 i 5.7, zaś porównanie wyników obliczeń z przebiegami zarejestrowanymi na oscyloskopie na rysunkach 5.8 i 5.9.



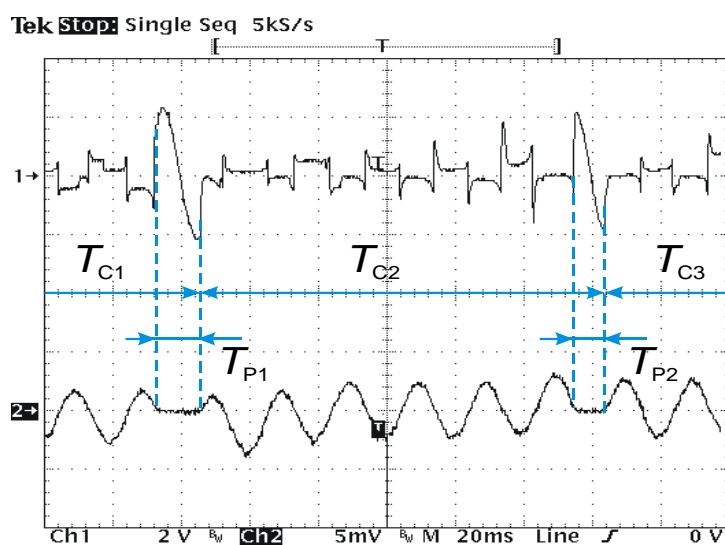
Rys. 5.6. Wyniki modelowania ślizgającego się łuku w jednofazowym obwodzie RL w czasie 1 cyklu pracy [144]



Rys. 5.7. Charakterystyki statyczne symulowanego wyładowania [144]



Rys. 5.8. Napięcie (górny przebieg) i prąd (poniżej) ślizgającego się wyładowania łukowego – wyniki uzyskane numerycznie [142]



Rys. 5.9. Napięcie (górny przebieg) i prąd (poniżej) ślizgającego się wyładowania łukowego – wyniki uzyskane numerycznie

Modyfikacje zaciskowych modeli matematycznych wyładowań łukowych pozwalają na przeprowadzenie numerycznej analizy i symulację wzajemnego oddziaływania układu reaktor plazmowy – źródło zasilania,

w różnych stanach pracy i przy różnych założeniach upraszczających. Uwzględnienie w modelu Ayrton zmiennej długości wyładowania pozwala uzyskać jakościowe wyniki zgodne z eksperymentami, choć nie pozwala ich uogólnić na szerszą klasę reaktorów, z uwagi na występujące w modelu wyładowania współczynniki empiryczne, konieczne do wyznaczenia w obiekcie rzeczywistym.

Modyfikacje modeli zaciskowych Mayr'a i Cassie'go pozwalają uzyskać wyniki modelowania, które prezentują wysoką zgodność jakościową z przebiegami zjawisk w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Porównując wyniki uzyskane z modelu numerycznego z zarejestrowanymi na oscyloskopie w obiekcie rzeczywistym (rysunki 5.8 i 5.9) można stwierdzić, że model dobrze odwzorowuje cykliczność pracy reaktora, przerwy bezprądowe oraz kształty prądów i napięć reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym i może być wykorzystany do symulacji takich obiektów.

### **5.3. Modelowanie rozkładu temperatury w przestrzeni wyładowczej reaktora**

Badania nad parametrami plazmy wytwarzanej w reaktorach plazmowych odgrywają zasadniczą rolę przy projektowaniu układów przemysłowych. W plazmie niskotemperaturowej istnieją sprzyjające warunki do przebiegu różnego rodzaju reakcji chemicznych, ze względu na występowanie w niej wysokoenergetycznych cząstek [136]. Badania procesu plazmowego opiera się na wyznaczeniu jego właściwości, do których należą: chemiczny skład plazmy, energetyczny rozkład jej składników oraz procesy przenoszenia takie jak: przewodność cieplna i elektryczna plazmy. Problemy te są bardzo trudne do rozwiązania w warunkach plazmy nieizotermicznej, w których nie tylko temperatury kinetyczne cząstek różnego rodzaju są różne, lecz także zachodzi znaczne odchylenie od rozkładu Maxwella i nie jest spełnione prawo Boltzmanna oraz prawo

działania mas. W warunkach tych nie można wykorzystać odpowiednich zależności, opracowanych na bazie termodynamiki i teorii kinetycznej gazów. Z punktu widzenia termodynamiki, gdy energia oddziaływania między cząsteczkami jest mała, w porównaniu z energią cieplną, można założyć, że plazma zachowuje się jak gaz doskonały. Wtedy, z pewnym przybliżeniem, uzasadniony jest maxwellowski rozkład prędkości i boltzmannowski rozkład energii cząstek. Jednakże z samego charakteru plazmy wynika, że obraz oddziaływania przez zderzenia par cząstek trzeba uzupełnić, albo nawet zastąpić, obrazem tak zwanego oddziaływania kolektywnego (zbiorowego). Znaczący to, że występuje oddziaływanie każdej cząstki z wieloma innymi jednocześnie, gdyż siły działające między naładowanymi cząstkami plazmy są natury elektrostatycznej. Należy również pamiętać, że plazma, w odróżnieniu od gazu obojętnego, przewodzi prąd elektryczny, z czego wynika jej specyficzne zachowanie się w polu magnetycznym. Dla nieizotermicznej plazmy wyładowań elektrycznych, ważną wielkością jest średnia energia kinetyczna (temperatura) elektronów. Energię tę można przyrównać do średniej energii kinetycznej cząstek gazu, które mają maxwellowski rozkład prędkości, odpowiadający określonej temperaturze. Wartość tej temperatury nazwano temperaturą gazu elektronowego plazmy, mimo że w nieizotermicznej plazmie nie ma równowagi termodynamicznej. Temperatura gazu elektronowego ma więc charakter umowny i na podstawie jej wartości nie można wyciągnąć żadnych wniosków opartych na prawach termodynamiki. Podobnie, nie można prowadzić obliczeń termodynamicznych na podstawie temperatury obojętnych składników plazmy nieizotermicznej. Parametry plazmy nieizotermicznej (o małym natężeniu prądu) i plazmy termicznej (o dużym natężeniu prądu) przedstawia tabela 5.1. Nierównowagowa plazma nietermiczna jest trudna do teoretycznego opisu, ponieważ w najlepszym razie znajduje się w równowadze kinetycznej (plazma kwazirównowagowa), natomiast nie można przyjąć, że jest w równowadze termicznej, a więc

nie można analizować składu plazmy korzystając z równania Saha, i obliczać promieniowania, korzystając z równania Stefana-Boltzmann'a.

Właściwości plazmy są najczęściej obliczane przy założeniu równowagi termicznej, które jest bliskie rzeczywistości [138]. Ponieważ obliczenia właściwości plazmy nierównowagowej są bardzo złożone, a w plazmotronach łukowych odchylenia od stanu równowagi są niezbyt duże [137, 142], stąd do wyznaczenia właściwości plazmy często stosuje się zależności przynależne stanom równowagi.

Tabela 5. 1. Porównanie parametrów wyładowania termicznego i nietermicznego [137]

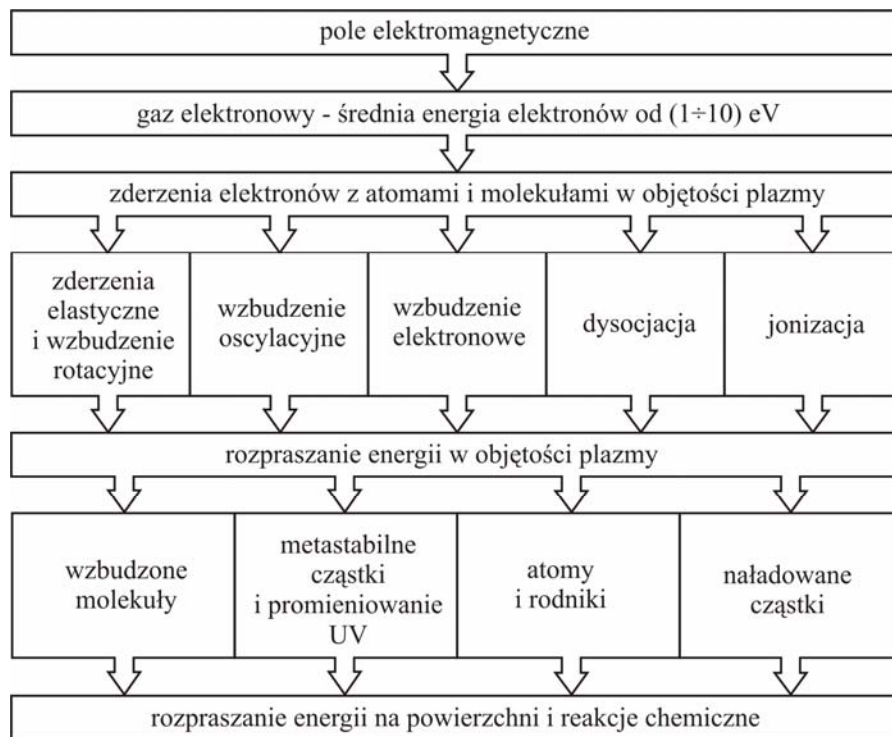
Parametry plazmy	Plazma nietermiczna	Plazma termiczna
Stan równowagi	Równowaga kinetyczna	Równowaga termiczna
Gęstość elektronów, $n_e$ ( $m^{-3}$ )	$10^{20} < n_e < 10^{21}$	$10^{21} < n_e < 10^{23}$
Ciśnienie, $p$ (Pa)	$10^{-1} < p < 10^5$	$10^5 < p < 10^7$
Temperatura elektronów $T_e$ (eV)	$0,2 < T_e < 2,0$	$1,0 < T_e < 10$
Temperatura gazu, $T_g$ (eV)	$0,025 < T_g < 0,5$	$T_g = T_e$
Prąd wyładowania, $I$ (A)	$1 < I < 50$	$50 < I < 10^4$
Promieniowanie	Nieokreślone	Równowagowe
Stopień jonizacji	Nieokreślony	Saha

Istotnym parametrem, z punktu widzenia procesów plazmochemicznych, jest rozkład temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego. Jego analiza może być prowadzona w różny sposób, w zależności od rodzaju stosowanego reaktora (geometria elektrod) oraz od procesów fizykochemicznych zachodzących w reaktorze. Budowa modelu matematycznego reaktora plazmy nierównowagowej wymaga określenia:

- parametrów geometrycznych układu (długość, średnica i kształt elektrod, odległość między elektrodami, objętość przestrzeni wyładowania),



- parametrów przepływającego gazu (rodzaj przepływu – laminarny, turbulentny, prędkość przepływu, ciśnienie, stopień jonizacji, lepkość),
- parametrów układu zasilania (dostarczana moc, częstotliwość, wartość i kształt napięcia, impedancja układu zasilania).



Rys. 5.10. Przemiany energii i zjawiska w plazmie nietermicznej

Przemiany energii w nietermicznej plazmie można przedstawić w postaci schematu pokazanego na rysunku 5.10.

Analiza modelu fizycznego, oraz zjawisk związanych z przemianami energii, pozwala określić, niezbędne do skonstruowania modelu matematycznego, parametry plazmy nietermicznej i podzielić je na:

- zależne od temperatury  $T$ :
  - przewodność cieplna gazu  $\lambda$ ,
  - ciepło właściwe  $c_p$ ,

- konduktywność plazmy  $\sigma$ ,
- gęstość właściwa gazu  $\rho$ .
- niezależne od temperatury:
  - prędkość plazmy – promieniowa  $v$  i osiowa  $u$ ,
  - lepkość gazu  $\mu$ ,
  - ciśnienie gazu  $p$ ,
  - natężenie prądu w łuku  $I$ ,
  - natężenie pola elektrycznego  $E$ .

Stopień jonizacji gazu, prędkość, temperatura cząstek i ciśnienie, opisywane są równaniami zachowania masy, pędu i energii.

Zakładając laminarny przepływ plazmy w reaktorze, równania, wiążące podstawowe parametry fizyczne plazmy, wynikające z wymienionych równań równowagi w układzie współrzędnych cylindrycznych, mają postać [133÷135]:

$$\frac{\partial}{\partial z}(u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r v) = 0 \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(u^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r u v) = 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r M \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r M \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r v^2) = \frac{\partial}{\partial z} \left( M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r M \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( M \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{2M}{r^2} - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5.15)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - u c_p \frac{\partial T}{\partial z} - c_p \frac{\partial T}{\partial r} + E^2 = 0 \quad (5.16)$$

$$E = \frac{I}{2 \int_0^R r \cdot dr} \quad (5.17)$$

Równania (5.13) do (5.17) mogą zostać rozwiązane za pomocą dowolnych metod numerycznych, przy czym najprościej jest zastosować metodę różnic skończonych lub elementów skończonych. Podstawowym równaniem, pozwalającym wyznaczyć rozkład temperatury w kolumnie

łukowej, jest równanie bilansu mocy opisane zależnością (5.16). Ze względu na małą wartość prędkości promieniowej plazmy  $v$ , w porównaniu z osiową  $u$  ( $= 0,05 u$ ) [230, 244], czynnik z nią związany w równaniu bilansu mocy można pominąć. Upraszcza to równanie (5.16), nie wpływając w znaczny sposób na wyniki obliczeń.

W praktyce pojawiają się trudności z rozwiązaniem równania (5.16) ze względu na złożoną zależność parametrów  $\nu$ ,  $c_p$ ,  $i$ , od aktualnej temperatury w przestrzeni wyładowań. W modelu matematycznym przyjęto, na podstawie pomiarów [130, 133], że wyżej wymienione parametry są nieliniowo zależne od temperatury. W podobny sposób wprowadzone zostały do modelu matematycznego pozostałe parametry zależne od temperatury.

Równanie różniczkowe drugiego rzędu (5.16), bilansu mocy w kolumnie łukowej, można przekształcić do równania różnicowego. W tym celu wprowadzono do analizowanego układu kwadratową siatkę dyskretyzującą, a opis różnicowy wykonano dla dowolnego punktu wewnętrznego  $P$  siatki o współrzędnych  $i, j$  [174, 182].

Dla zadanego promienia kanału plazmowego, jego długości i znanego w postaci analitycznej rozkładu temperatury na katodzie plazmotronu (źródła), równanie bilansu mocy (5.16) można zapisać w następującej postaci różnicowej:

$$T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j} + \frac{k}{2R}(T_{i,j+1} - T_{i,j}) = -\frac{E^2}{k^2} \quad (5.18)$$

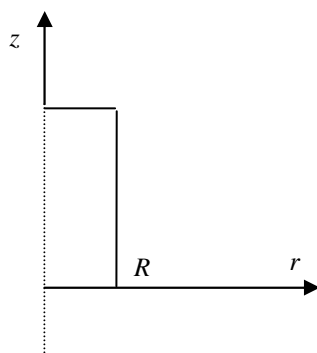
Po przekształceniu otrzymamy zależność na temperaturę  $T_{i,j}$  w punkcie o współrzędnych  $i, j$  siatki:

$$T_{i,j} = \frac{1}{4} \left[ T_{i,j-1} \left( 1 - \frac{k}{2R} \right) + T_{i,j+1} \left( 1 + \frac{k}{2R} \right) + T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + \frac{E^2}{k^2} \right] \quad (5.19)$$

gdzie,  $k$  – krok siatki,  $R$  – promień komory wyładowczej.

Biorąc pod uwagę cylindryczną konstrukcję plazmotronu przyjęto układ współrzędnych biegunowych  $(z, r)$ , dla których warunki brzegowe mają postać (rys. 5.11):

- warunek na osi symetrii dla  $r = 0$   $\frac{\partial T}{\partial r} = 0,$
- warunek na ściankach bocznych dla  $r = R$   $T = 300 \text{ K},$
- warunek na końcu elektrod reaktora plazmowego  $\frac{\partial T}{\partial z} = 0.$



Rys. 5.11. Przyjęta geometria analizowanego obszaru plazmy we współrzędnych cylindrycznych

Przyjęto różną temperaturę źródła – katody, którą opisano w każdym punkcie następująca zależnością:

$$T = \frac{T_{\max}}{a^2} (a^2 - r^2) + T_0 \quad (5.22)$$

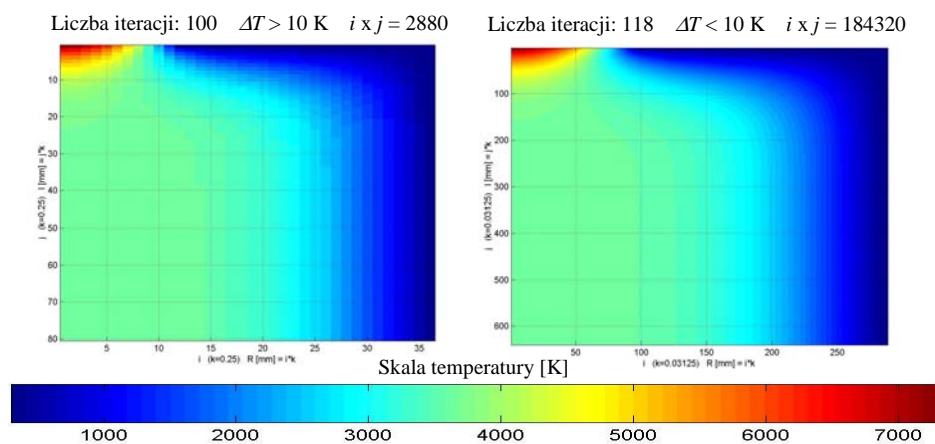
gdzie:

- $r$  – współrzędna biegunowa,
- $T_{\max}$  – maksymalna temperatura na katodzie,
- $T_0$  – temperatura poza obszarem katody,
- $a$  – odległość od środka katody.

Wyniki symulacji numerycznej rozkładu pola temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego w argonie, przedstawiono na rysunku 5.12 dla dwóch różnych kroków siatki:  $\Delta T > 10 \text{ K}$  i  $\Delta T < 10 \text{ K}$  po 100

i 118 iteracjach. Obraz przestrzenny rozkładu temperatury otrzymuje się poprzez obrót wykresu z rysunku 5.12 wokół osi z.

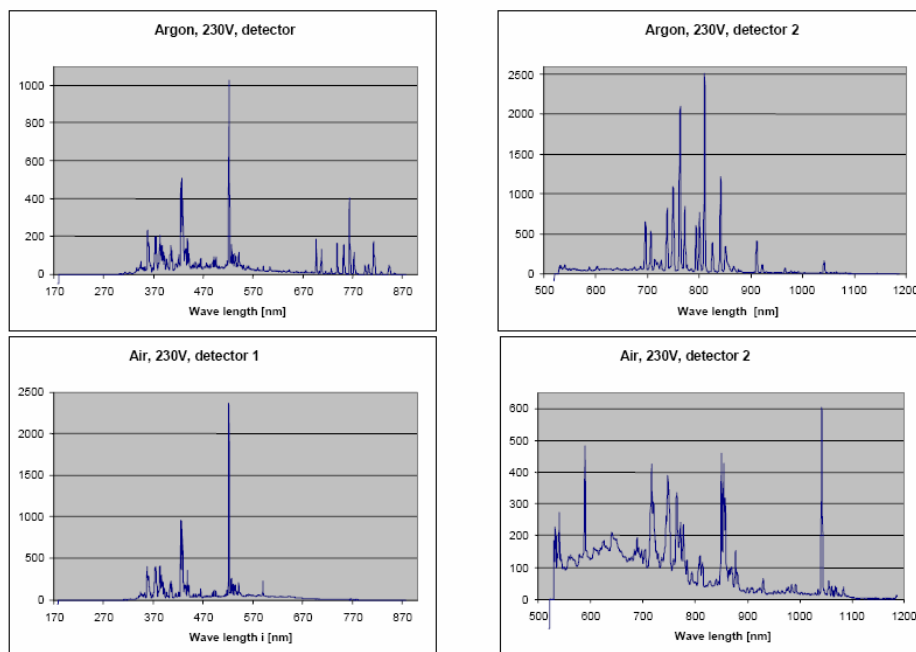
Przedstawiony model matematyczny nie ogranicza się do symulacji rozkładu pola temperatury i pozwala przeprowadzić obliczenia innych parametrów plazmy, które zależą od rozkładu temperatury [135].



Rys. 5.12. Wynik symulacji numerycznej rozkładu temperatury w komorze wyładowczej reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

Weryfikację matematycznego modelu rozkładu temperatury i energii cząstek plazmy w komorze wyładowczej reaktora plazmowego można przeprowadzić, analizując spektrum wyładowania zarejestrowane, na przykład, za pomocą spektrometru optycznego. Przykładowe spektra ślizgającego się łuku elektrycznego, zarejestrowane w argonie i powietrzu, przedstawia rysunek 5.13. Wynika z nich, że gazy technologiczne, wykorzystane w eksperymencie, zawierały zanieczyszczenia oraz związki pochodzące z elektrod na skutek erozji elektroiskrowej. Zastosowane w eksperymentach elektrody wykonane były ze stali kwasoodpornej zawierającej znaczne ilości chromu i niklu a także pewne ilości magnezu, tytanu, molibdenu i miedzi. Te zanieczyszczenia i wtrącenia, pochodzące z materiału elektrod, mogą wpływać na statyczne i dynamiczne charakterystyki ślizgającego się wyładowania łukowego. Ponadto, w reaktorach z dodat-

kową elektrodą zapłonową, zanieczyszczenia mogą obniżyć bądź podwyższać wartość wytrzymałości na przebicie przestrzeni międzyelektrodowej. Wysoka zawartość zanieczyszczeń może, w ekstremalnej sytuacji, doprowadzić do zatrzymania wyładowania.



Rys. 5.13. Spektrogramy promieniowania optycznego ślizgającego się wyładowania łukowego w argonie i powietrzu

Przeprowadzona on-line diagnostyka spektrum promieniowania, podczas wyładowania razem z przebiegami prądu i napięcia, może służyć jako skuteczny sposób kontroli charakterystyk dynamicznych reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, w czasie rzeczywistym. Spektroskopowa diagnostyka plazmy ślizgającego się wyładowania łukowego jest użytecznym narzędziem wyjaśnienia mechanizmu przejścia ze stanu równowagi termodynamicznej do stanu nierównowagowego. Dostarcza ona wskazówek do projektowania takiego układu zasilania w energię elektryczną, który będzie w stanie zapewnić jak najdłuższy czas trwania stanu nierównowagowego oraz nietermiczne warunki

generowanej plazmy, w całej objętości komory wyładowczej reaktora [159, 168, 171, 174, 182]

#### **5.4. Podsumowanie**

Analiza numeryczna urządzeń wyładowczych, ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, jest zagadnieniem stosunkowo złożonym, z uwagi na konieczność zamodelowania bardzo skomplikowanych nieliniowych zjawisk towarzyszących wyładowaniom elektrycznym. Poprawne modelowanie zjawisk zapłonu wyładowań, cyklicznej pracy reaktora i jego charakterystyk dynamicznych, o parametrach charakteryzujących się znaczną zmiennością przestrzenno-czasową, wymaga istotnej modyfikacji znanych i stosowanych w praktyce modeli wyładowań łukowych.

Przeprowadzona na przykładzie reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym analiza numeryczna pokazała, że możliwe jest poprawne modelowanie wymienionych zjawisk, wykorzystując modele zaciskowe łuku elektrycznego.

Zgodność obliczeń numerycznych z wynikami eksperymentu, pozwala dobrze ocenić przyjęte do analizy modele zaciskowe ślizgającego się wyładowania łukowego.

Zaproponowane modele numeryczne ślizgającego się wyładowania łukowego nie uwzględniają wszystkich parametrów, które mogą mieć wpływ na pracę reaktora. Dalsze badania powinny być ukierunkowane na analizę wpływu takich czynników jak: skład chemiczny gazu roboczego, jego prędkość, oraz elektryczne parametry zasilacza, na charakterystyki reaktora ze ślizgającym się łukiem. Obiecujące wydają się również modele stochastyczne i zastosowanie teorii chaosu do modelowania zjawisk w ślizgającym się wyładowaniu łukowym. Przedstawiona analiza numeryczna, może stanowić wygodne narzędzie przy projektowaniu i budowie reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem, i innych reaktorów plazmowych o podobnej charakterystyce prądowo-napięciowej.

## **6. ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII NIETERMICZNEJ PLAZMY W PROCESACH STERYLIZACJI**

Jednym z intensywnie rozwijanych obszarów zastosowań nietermicznej plazmy są technologie ochrony środowiska naturalnego, a w szczególności oczyszczanie powietrza, wody i mediów stałych z zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych [250÷256]. Poniżej przedstawione zostaną wyniki badań wykorzystania nietermicznej plazmy w procesach sterylizacji gleby.

Sterylizacja i dezynfekcja (odkażanie) mają na celu wyeliminowanie bądź ograniczenie aktywności biologicznej mikroorganizmów (bakterii, grzybów, pleśni) w medium poddawanych obróbce ale w taki sposób, aby nie zmienić jego właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych, a w wypadku gleby, aby nie zmniejszyć istotnie jej właściwości odżywczych i płodności. Procesy sterylizacji i dezynfekcji prowadzone są różnymi metodami, które ze względu na rodzaj głównego czynnika sterylizacji dzieli się na:

- metody fizyczne – bazujące na wysokiej temperaturze (pasteryzacja gorącym suchym lub wilgotnym powietrzem – autoklawy), mikrofała, solaryzacja, promieniowanie (UV, gamma), ultradźwięki,
- metody chemiczne – wykorzystujące substancje lotne, ciekłe i stałe (chloroform, tlenek etylu, bromek metylu, chlor, nadtlenek wodoru, chlorek rtęci, podchloryn sodu, dwutlenek chloru, chloraminy, chlor, brom i jod),
- biotechnologie – których działanie opiera się na pracy mikroorganizmów oraz wykorzystaniu szczepów bakteryjnych do wytwarzania enzymów i środków powierzchniowo-czynnych. Enzymy rozkłada-



ją zawarte w wodzie tłuszcze, a biologiczne środki powierzchniowo-czynne oczyszczają powierzchnię,

- procesy membranowe – odwrócona osmoza, ultrafiltracja, elektrodializa – w których separacja zanieczyszczeń odbywa się na poziomie molekularnym lub jonowym, wykorzystywane do odsalania, zmiękczenia wody, usuwania substancji organicznych.

Współcześnie stosowane metody dezynfekcji i sterylizacji przedstawiono w tabelicy 6.1, podając ich główne wady i zalety. Wszystkie wymienione w tabeli 6.1 metody, są w większym lub mniejszym stopniu stosowane w laboratoriach badawczych i w praktyce. Metody termiczne są stosunkowo proste i najłatwiej osiągalne, ale mogą powodować zmiany struktury gleby i uwalnianie aminokwasów. Metody wykorzystujące napromieniowanie są skuteczne, nie powodują istotnych zmian właściwości medium poddawanego obróbce, ale ich stosowanie jest ograniczone, głównie z powodu drogich urządzeń i technologii, zwłaszcza, gdy mają być poddawane obróbce duże ilości gleby (in-situ).

Metody chemiczne są najczęściej stosowane w procesach sterylizacji gleby, ale pozostawiają w glebie toksyczne substancje chemiczne. Wykorzystywany powszechnie do sterylizacji gleby bromek metylu ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ), został zakwalifikowany do związków odpowiedzialnych za efekt „dziury ozonowej” i stąd potrzeba poszukiwania alternatywnych metod sterylizacji i dezynfekcji gleby i zainteresowanie metodami plazmowymi.

Badania na wykorzystaniem nietermicznej plazmy w procesach obróbki gleby, zapoczątkowane zostały przez autorkę książki w Laboratorium Przemian Energii Uniwersytetu Kumamoto w Japonii.

Tabela 6.1. Metody sterylizacji i dezynfekcji

Czynnik	Metoda	Zalety i wady
Ciepło	Pasteryzacja, gotowanie	Najprostsza technika, stosowanie ograniczone do gospodarstw domowych i wody w niewielkich zbiornikach wodnych.
	Mikrofale	Szybka i selektywna metoda odkażania, przyjazna dla środowiska, ale o dużym zapotrzebowaniu na energię.
Promieniowanie	Ultrafioletowe gamma	Wysoka skuteczność i wydajność, brak konieczności stosowania środków chemicznych, nie występuje groźba przedawkowania środka, wymaga znacznych nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.
Membrana	Odwrócona osmoza ultrafiltracja elektrodializa	Nie wymagają dawkowania chemikaliów i nie powodują transformacji zanieczyszczeń. Największe zastosowania w odsalaniu wody, oczyszczaniu ścieków, przygotowaniu wody ultra czystej.
Ultradźwięki	Myjki i płuczki	Wspomagają procesy utleniania i rozpadu wielkocząsteczkowych związków organicznych pochodzenia przemysłowego, wykorzystywane przy utylizacji ścieków. Zastosowanie ultradźwięków do dezynfekcji wody nie wyszło poza sferę badań laboratoryjnych i półtechnicznych i dotyczy niewielkich zbiorników.
Bromek metylu, chlor, fluor	Chemiczna	Bardzo często wykorzystywana metoda odkażania i dezynfekcji wody i mediów stałych (gleby), szkodliwe dla środowiska substancje mogą pozostawać w wodzie i glebie przez długi okres.
Ozon, tlenki azotu	Plazma niskotemperaturowa	Powszechnie wykorzystywana do uzdatniania wody zamiast szkodliwego chloru. Stosowana w przemyśle elektronicznym do odfuszczenia płytek obwodów drukowanych; wykorzystuje silne właściwości bakterioobójcze ozonu i mono tlenku azotu.

W następnym rozdziale przedstawiono wybrane wyniki tych badań które wykazały, że technologie nietermicznej plazmy w procesach sterylizacji są konkurencyjnym, a nade wszystko przyjaznym dla środowiska rozwiązaniem, w stosunku do konwencjonalnych metod chemicznych i termicznych.

## 6.1. Obróbka gleby

W rolnictwie, technologie nietermicznej plazmy stosowane są od kilkunastu lat w procesach pasteryzacji i dezynfekcji żywności, przy ograniczaniu i usuwaniu pestycydów z owoców i do rozmiękania zboża. Zastępują coraz częściej w tych procesach, powszechnie stosowane związki chloru i siarki [243, 244], nie powodując jednocześnie zmniejszenia wartości smakowych i odżywczych produktów żywnościowych. Wytwarzane w nietermicznej plazmie cząstki i rodniki (ozon  $O_3$ , tlenek azotu  $NO$ , promieniowanie UV, a w obecności par wody także  $OH$  i  $H_2O_2$ ), nie tylko dezynfekują produkty żywnościowe, ale także poprawiają ich właściwości smakowe i odżywcze oraz pozwalają istotnie przedłużyć okres ich przechowywania.

Korzyści wynikające z zastosowania ozonu w przemyśle rolno-spożywczym wynikają z dwóch głównych powodów:

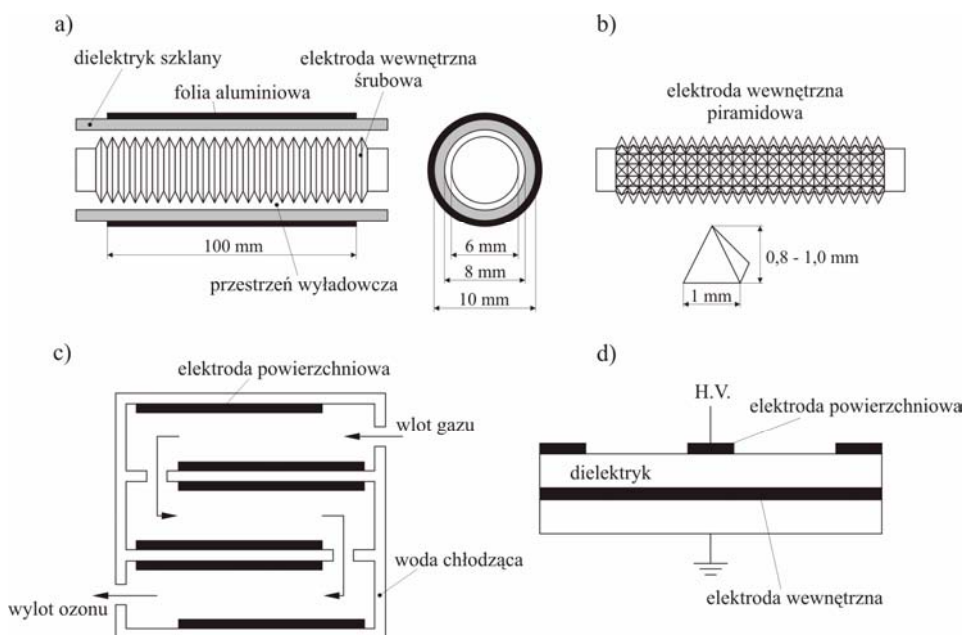
- jego właściwości: ozon ma stosunkowo krótki czas połowicznego rozpadu (rzędu kilkunastu minut w temperaturze pokojowej) i obróbka gleby ozonem nie skutkuje powstawaniem w glebie substancji toksycznych, ozon bowiem rozpada się na tlen cząsteczkowy i jest natychmiast wykorzystywany w glebie,
  - sposobu wytwarzania: ozon nie może być gromadzony, a musi być wytwarzany w miejscu, gdzie jest wykorzystywany, co uniemożliwia nagłe uwolnienie do atmosfery dużych jego ilości; inaczej niż podczas transportu takich substancji jak chlor, bromek metylu, fluor, etylen, itp.
- Badania nad plazmową sterylizacją gleby, których wyniki przedstawiono poniżej, obejmowały:
- wybór rodzaju reaktora plazmowego, jako źródła czynników sterylizacji (ozonu, tlenku azotu),

- określenie elektrycznych parametrów sterylizacji oraz zbadania możliwości sterowania parametrami procesu,
- wybór i przetestowanie metody analizy właściwości gleby poddanej obróbce plazmo-chemicznej,
- określenie wysokości dawki O<sub>3</sub>/NO oraz wpływu czasu ekspozycji, konduktywności, temperatury i innych parametrów gazu plazmowego, na skuteczność procesu sterylizacji gleby.
- badanie wzrostu roślin w glebie poddanej obróbce plazmowej.

W szczególności przebadano reaktory barierowe o elektrodach wysokonapięciowych w postaci śruby i piramidy dla różnych przepływów gazu (powietrza, tlenu), długości elementów wyładowczych, obecności i sposobu chłodzenia elektrod i od elektrycznych parametrów zasilania (wartości napięcia, mocy, częstotliwości). Zbadano także wpływ plazmowej obróbki gleby na jej przewodność, kwasowość oraz zawartość substancji azotowych – czynniki, które mają istotny wpływ na właściwości gleby, jej żyzność i proces wzrostu roślin.

Wyładowania elektryczne barierowe i powierzchniowe generowane były w reaktorach, których geometrię przedstawiono na rysunku 6.1. Elektrody w kształcie śruby i piramidy wykonane były ze stali nierdzewnej i w większości badań dołączone były do zacisku wysokonapięciowego źródła. Elektrode niskonapięciową (uziemiającą) stanowiła folia aluminiowa bądź miedziana umieszczona na/lub wewnątrz elektrody (rurki) szklanej (Rys. 6.2). Podczas eksperymentu, w którym badano wpływ chłodzenia elektrod reaktora na koncentrację ozonu i wydajność jego wytwarzania, elektroda śrubowa bądź piramidowa, wydrążone wewnątrz, były chłodzone wodą i wtedy stanowiły elektrodę uziemiającą, a zacisk źródła

wysokiego napięcia dołączony był do zewnętrznej opaski miedzianej, umieszczonej na elektrodzie kwarcowej (Rys. 6.2).

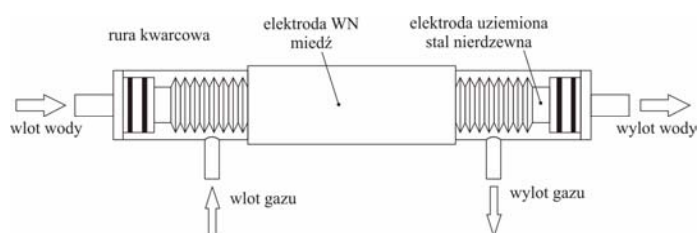


Rys. 6.1. Konfiguracje elektrod badanych reaktorów z barierą dielektryczną: a) reaktor z elektrodą kształcie śruby, b) elektroda piramidowa, c) reaktor z wyładowaniami powierzchniowymi, d) idea budowy elementu wyładowczego reaktora z wyładowaniami powierzchniowymi

Pomiary wykonywano dla czterech długości elektrod reaktora: 100, 200, 300 i 400 mm, dla powietrza i tlenu jako gazu plazmowego, przy dwóch prędkościach przepływu gazu, przy ciśnieniu atmosferycznym. System pomiarowy przedstawiony na rysunku 6.3 składał się z generatora fali sinusoidalnej o regulowanej częstotliwości i napięciu, układu dozowania i regulacji przepływu gazów roboczych, mierników koncentracji ozonu i tlenków azotu oraz mierników napięcia, prądu i mocy. Przebiegi chwilowe prądu i napięcia wyładowań barierowych rejestrowano oscylograficznie, a moc czynną wyładowań wyznaczano z krzywych Lissajous

[91]. Warunki eksperymentu i parametry geometryczne badanych reaktorów zestawiono w tabelicy 6.2.

a)

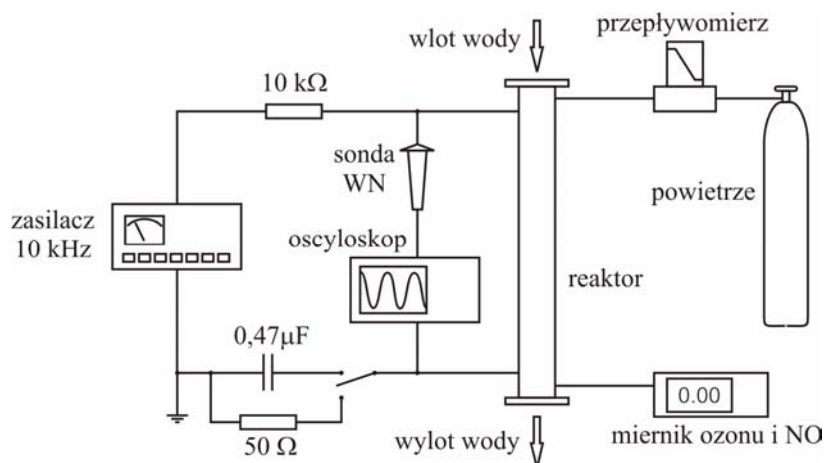


b)



Rys. 6.2. Ozonator z elektrodą śrubową chłodzoną wodą (a), b) zdjęcie ozonatora laboratoryjnego

Gaz powstający w wyniku wyładowań w powietrzu, będący mieszaniną ozonu i tlenków azotu, wprowadzano do próbek gleby umieszczonych w komorze klimatyzacyjnej.



Rys. 6.3. Schemat układu pomiarowego

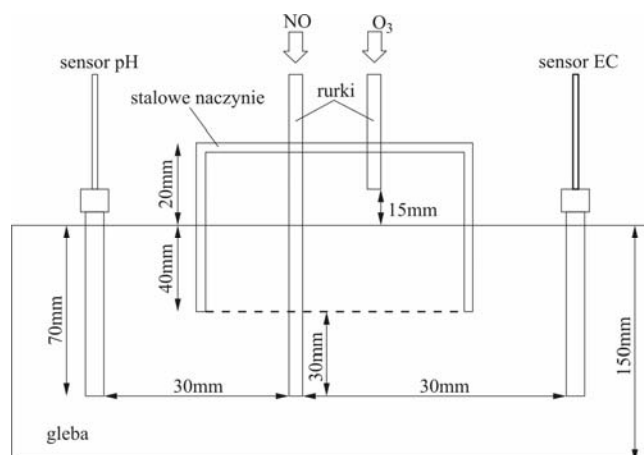
Koncentracje ozonu i tlenku azotu, wprowadzanych do próbek gleby, wynosiły od 100 ppm do 50 000 ppm [193]. Badano także głębokość, na

jaką gaz plazmowy penetruje próbkę gleby oraz wpływ jego czasu kontaktu na właściwości biologiczne, fizyczne i chemiczne gleby. Parametry gleby (kwasowość pH, przewodność elektryczną EC, zawartość związków azotu  $\text{NO}_3\text{NH}$  i  $\text{NH}_3\text{NO}$  oraz temperaturę) mierzono umieszczając w zbiorniku z glebą dwa zestawy czujników (rys. 6.4).

Tabela 6.2. Parametry geometryczne reaktora i warunki eksperymentu

Długość elektrod, mm	100, 200, 300, 400
Kształt elektrod	śruba, piramida (0,8mm; 1 mm)
Długość szczeliny, mm	1
Częstotliwość napięcia zasilającego, kHz	10, 30, 50
Przepływ gazu roboczego, lit/min	1, 2
Ciśnienie gazu, atm	1
Rodzaj gazu	powietrze, tlen (czystość 99,9%)
Chłodzenie elektrod	brak, wodne

Zbiornik z glebą umieszczony był w komorze klimatyzacyjnej o kontrolowanych warunkach naświetlenia i temperatury.



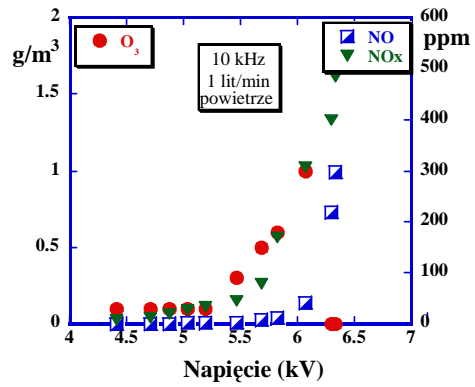
Rys. 6.4. Rozmieszczenie sensorów pH i EC w zbiorniku z glebą

Koncentrację ozonu  $O_3$  oraz tlenków azotu  $NO$  i  $NO_x$ , zmierzone w funkcji napięcia wyładowania dla trzech jego częstotliwości dla prędkości przepływu powietrza równej 1 lit/min, przedstawiono na rysunkach 6.5, 6.6 i 6.7. Wzrostowi częstotliwości napięcia zasilającego towarzyszy spadek koncentracji ozonu i wzrost koncentracji tlenków azotu. Dla częstotliwości 30 kHz i 50 kHz koncentracja ozonu w  $g/m^3$  była bliska zeru. Z punktu widzenia koncentracji ozonu optymalna częstotliwość zasilania wynosiła 10 kHz i dalsze badania były prowadzone dla tej częstotliwości.

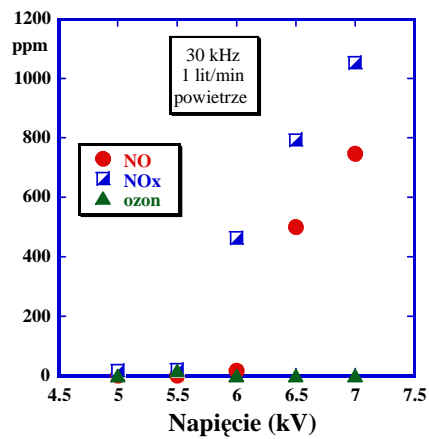
Wytwarzany w wyładowaniu barierowym tlenek azotu  $NO$ , jest aktywnym, choć niestabilnym, rodnikiem o podobnych właściwościach bakteriobójczych i dezynfekujących jak ozon. Stężenie tlenku azotu  $NO$  w gazie wylotowym badanego ozonatora rosło wraz z wartością napięcia i częstotliwości, osiągając wartość maksymalną równą 780 ppm przy  $f = 30$  kHz i  $U = 7$  kV (Rys. 6.6), przy czym wartość stężenia  $NO$  zależała od natężenia przepływu gazu. Jak wynika z rysunku 6.8, im większy przepływ gazu, tym mniejsze były wartości stężenia  $NO$ , i przy przepływie 3 lit/min, jego zawartość była pomijalnie mała. Koncentrację ozonu i tlenków azotu  $NO$  i  $NO_x$ , w najkorzystniejszych warunkach pracy ozonatora (prędkość przepływu powietrza – 2 lit/min, częstotliwość 10 kHz), w funkcji mocy dostarczanej do przestrzeni wyładowań, przedstawiono na rysunku 6.9.

Na rysunku 6.10 przedstawiono zależność koncentracji ozonu w funkcji napięcia zasilającego, dla różnych kształtów elektrody wysokonapięciowej, a na rysunku 6.11 dla porównania koncentracje ozonu uzyskiwane w reaktorze z wyładowaniami powierzchniowymi (rys. 6.1 c i d). Jak wynika z rysunku 6.11, w wyładowaniach powierzchniowych, można uzyskać znacznie większe koncentracje ozonu, dla tych samych wartości napięć, ale możliwości regulacji koncentracji ozonu w całym zakresie zmian napięcia zasilającego są bardziej ograniczone.

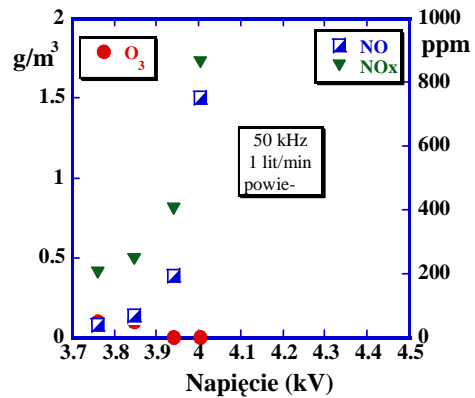




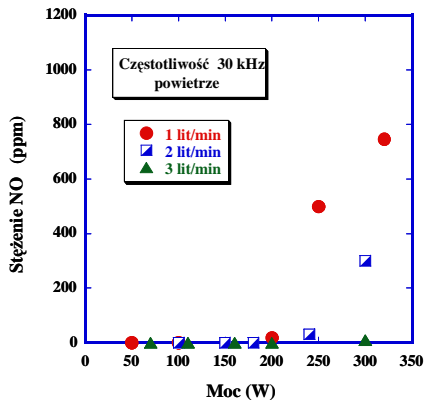
Rys. 6.5. Koncentracja O<sub>3</sub>, NO i NO<sub>x</sub> w funkcji napięcia dla  $f = 10$  kHz



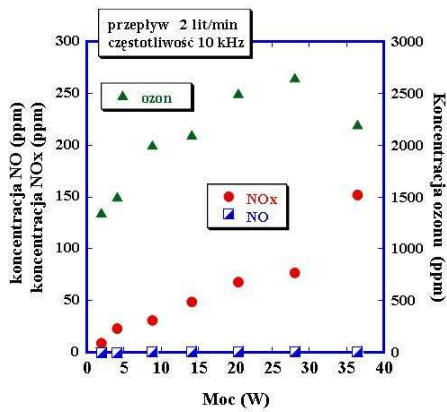
Rys. 6.6. Koncentracja O<sub>3</sub>, NO i NO<sub>x</sub> w funkcji napięcia dla  $f = 30$  kHz



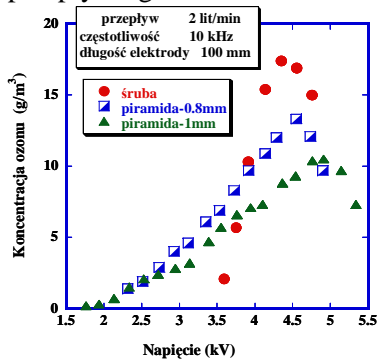
Rys. 6.7. Koncentracja O<sub>3</sub>, NO i NO<sub>x</sub> w funkcji napięcia dla  $f = 50$  kHz



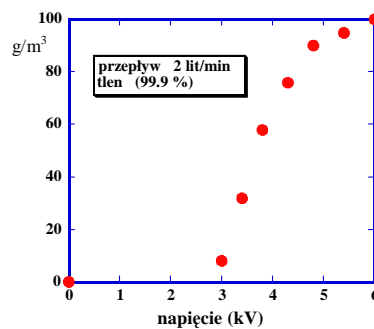
Rys. 6.8. Zależność stężenia NO w funkcji mocy wyładowania i prędkości przepływu gazu



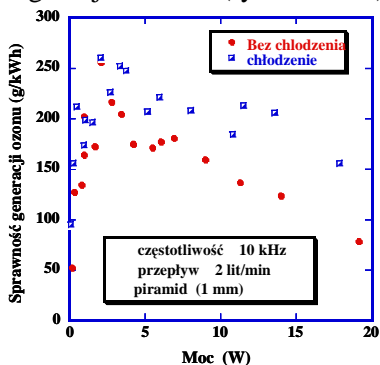
Rys. 6.9 Zależność koncentracji ozonu i tlenków azotu od mocy wyładowań i przepływu gazu



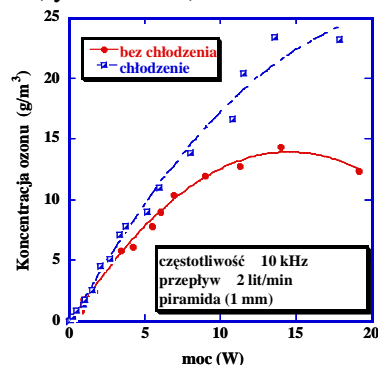
Rys. 6.10 Koncentracja ozonu w funkcji napięcia zasilającego dla różnych konfiguracji elektrod (rys. 6.1 a i b)



Rys. 6.11. Koncentracja O<sub>3</sub> w reaktorze z wyładowaniami powierzchniowymi (rys. 6.1.c i d)



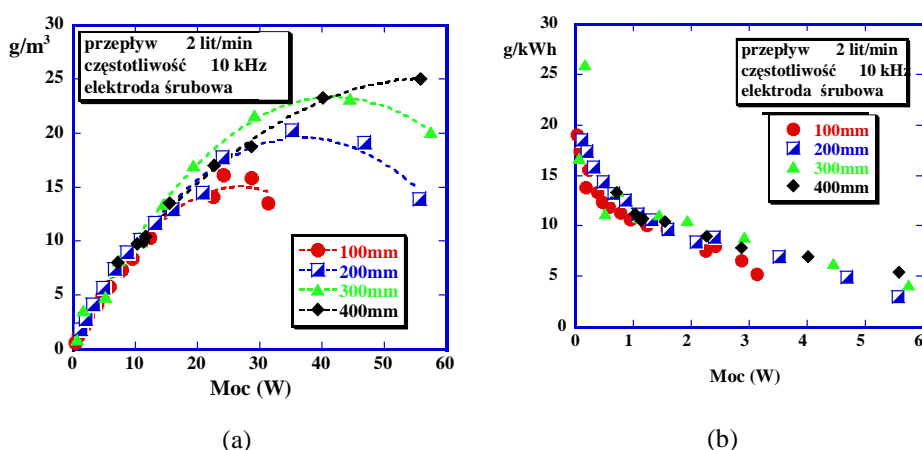
Rys. 6.12. Wpływ chłodzenia elektrody uziemionej na sprawność generacji ozonu



Rys. 6.13. wpływ chłodzenia elektrody uziemionej na koncentrację ozonu

Wpływ warunków chłodzenia elektrod na sprawność generacji ozonu i jego koncentrację przedstawiają rysunki 6.12 i 6.13. Jak wynika z rysunków 6.12 i 6.13 koncentracja ozonu, która w układzie bez chłodzenia elektrod osiąga wartość  $14 \text{ g/m}^3$ , zostaje dzięki chłodzeniu wodnemu prawie podwojona ( $23 \text{ g/m}^3$ ), zaś sprawność generacji ozonu przy mocy  $P = 15 \text{ W}$  wzrasta od wartości  $120 \text{ g/kWh}$  (bez chłodzenia elektrod) do  $200 \text{ g/kWh}$  w warunkach chłodzenia.

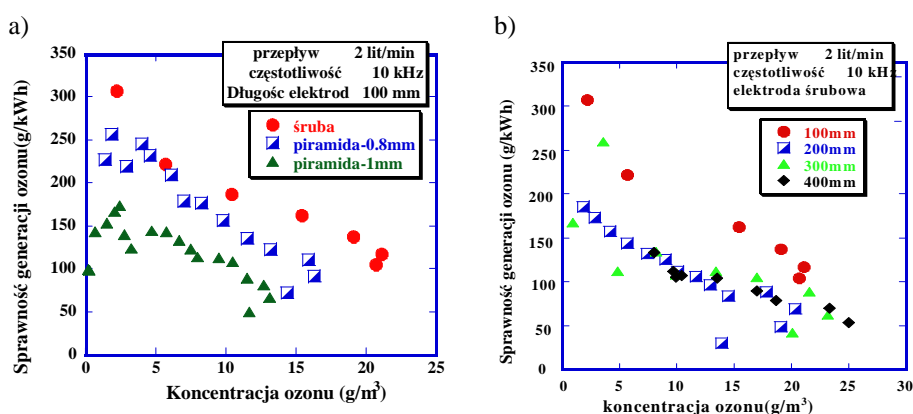
Zależność koncentracji ozonu, generowanego z tlenu w reaktorze z elektrodą śrubową i sprawność jego generacji, od długości elektrody wyładowczej, przedstawia rysunek 6.14.



Rys. 6.14. Wpływ długości elektrod na koncentrację ozonu (a) i sprawność jego generacji (b)

Wpływ długości elektrod na sprawność generacji ozonu jest niewielka, natomiast koncentracja ozonu (rys. 6.14 a) rośnie istotnie wraz z długością elektrod i jej maksimum przesuną się w stronę wyższych mocy. Dla reaktora o długości elektrod równej 400 mm, maksymalna koncentracja ozonu jest równa  $25 \text{ g O}_3/\text{m}^3$  przy  $P = 55 \text{ W}$ . Ważnym parametrem, określającym skuteczność generacji ozonu w wyładowaniu barierowym, jest zależność sprawności jego generacji w  $\text{g/kWh}$  od koncentracji w  $\text{g/m}^3$ . Sprawność generacji ozonu zależy także od rodzaju elektrod i ich

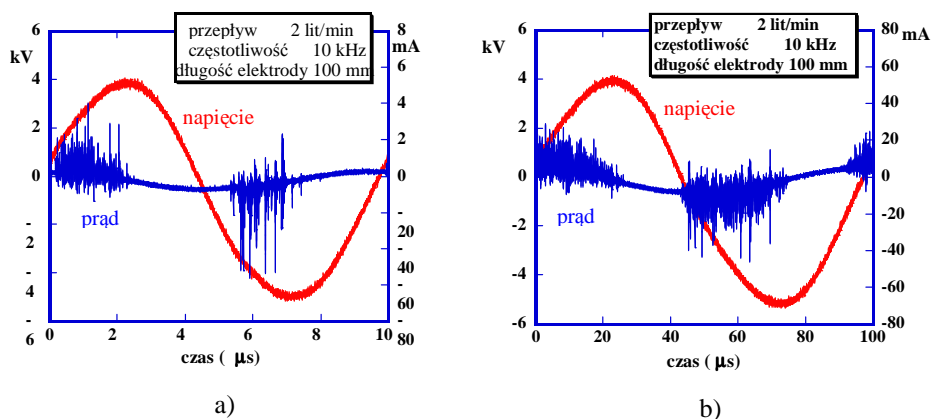
długości (Rys. 6.15). Jak wynika z przedstawionych na rys. 6.15 wyników, najlepszą sprawność generacji ozonu, przy akceptowalnej jego koncentracji, uzyskuje się w reaktorze z elektrodą w kształcie śruby o długości 100 mm. Wzrost długości elektrody daje większe koncentracje ozonu, ale przy mniejszej sprawności energetycznej procesu.



Rys. 6.15. Sprawność generacji ozonu w funkcji jego koncentracji dla różnych kształtów elektrod (a) i ich długości (b)

Przebiegi napięcia i prądu wyładowania barierowego w reaktorze z elektrodą śrubową i piramidową pokazano na rysunku 6.16. Wyładowanie ma strukturę włóknistą (z ang. filaments) i przebieg prądu składa się z nanosekundowych impulsów statystycznie rozłożonych w każdym półokresie zmian napięcia zasilającego. Ich liczba i amplituda zależą od wartości napięcia i częstotliwości a także od długości i kształtu elektrod. Zazwyczaj impulsy prądu nie są równomierne rozmieszczone w dodatnim i ujemnym cyklu napięcia zasilającego. Mają wyższą amplitudę i są mniej gęsto rozmieszczone, gdy elektroda wysokonapięciowa jest chwilową katodą, co jest szczególnie widoczne dla dłuższych elektrod. Przy stałej długości elektrod podwyższenie napięcia zasilającego prowadzi do bardziej równomiernego rozmieszczenia impulsów prądu. Kształt elektrody wysokonapięciowej, przy stałej wartości napięcia i długości

elektrody, ma także wpływ na przebieg prądu wyładowania (rys. 6.16a i b).



Rys. 6.16. Przebiegi prądu i napięcia w reaktorze o długości elektrod 100 mm, z elektrodą śrubową (a) i piramidową 0,8 mm (b), dla napięcia  $U = 5,0$  kV

Dla elektrody piramidowej obserwuje się większą liczbę impulsów prądu o mniejszej amplitudzie i bardziej równomierne ich rozmieszczenie w dodatniej i ujemnej połówce przebiegu niż dla elektrody śrubowej. Zwiększona liczba impulsów prądu sprzyja wytwarzaniu ozonu na skutek dekompozycji tlenu, ale w kontakcie z licznymi mikro-wyładowaniami ozon rozpada się w tlen cząsteczkowy, co prowadzi do zmniejszenia koncentracji ozonu w reaktorze z elektrodą piramidową. Ponadto, wzrost temperatury elektrody szklanej, na skutek strat dielektrycznych przy wysokiej częstotliwości, powoduje destrukcję dopiero co wytworzonego ozonu. Otrzymane wyniki wskazują, że reaktor z elektrodą piramidową jest odpowiedni do generacji mniejszych koncentracji ozonu, podczas gdy reaktor śrubowy powinien być stosowany tam, gdzie wymagane są większe stężenia ozonu [193÷203, 246].

Wybrane wyniki obróbki gleby za pomocą ozonu o koncentracji 5000 ppm, czasie ekspozycji 30 min, przepływie gazu 1 l/min przedstawiono w tabelach 6.3 i 6.4. Stwierdzono ponad 98% spadek ilości bakterii w glebie oraz 87% zmniejszenie zarodników grzybów po obróbce plazmowej. Wśród bakterii zmniejszeniu uległa ilość odpowiedzialnych za tworzenie azotków (tzw. bakterii azotowych), co skutkowało zwiększeniem zawartości wskaźników  $\text{NH}_4\text{N}$  i  $\text{NO}_3\text{N}$ . Zawartość minerałów w glebie nie uległa istotnej zmianie po obróbce plazmowej.

Tabela 6.3. Wyniki obróbki gleby ozonem (\*)

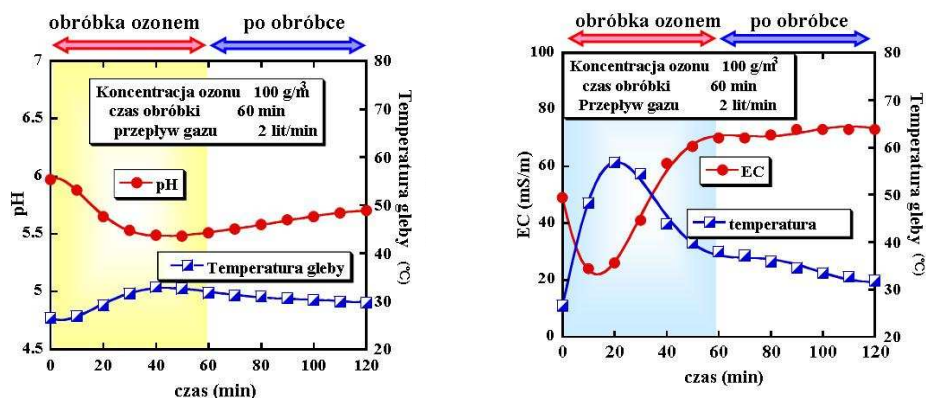
Próbka gleby	wilgotność %	EC mS/m	pH	$\text{NH}_4\text{-N}$ mg/100g	$\text{NO}_3\text{-N}$ mg/100g
bez obróbki	30.7	34	6.5	14.9	0.5
po obróbce	23.7	79	5	18	22

(\*)warunki obróbki: 5000 ppm, 30 minut, 1 lit/min.

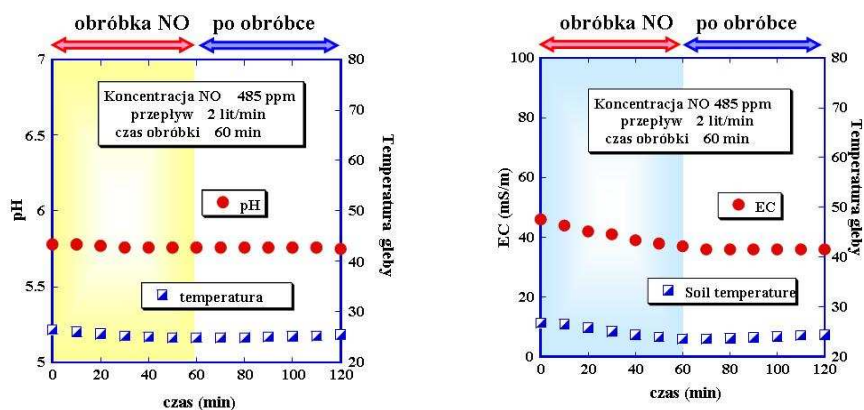
Tabela 6.4. Zawartość w glebie bakterii, grzybów i minerałów przed i po obróbce

Próbka gleby	Bakterie cfu/cc	Grzyby cfu/cc	Minerały, mg/100g					
			$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$	CaO	MgO	Fe	Mn
bez obróbki	$3.8 \cdot 10^7$	$1.8 \cdot 10^5$	674	37	1112	913	4721	612
po obróbce	$8.5 \cdot 10^5$	$2.7 \cdot 10^4$	700	44	1076	946	4697	637

Jakość gleby charakteryzowana jest poprzez jej kwasowość pH, przewodność elektryczną EC, zawartość wody pF oraz związków azotu  $\text{NH}_4\text{-N}$  i  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Wielkości te, wraz z temperaturą gleby, badano w czasie 60 minut wprowadzania ozonu bądź tlenu azotu NO do próbki gleby, oraz po obróbce ozonem podczas kolejnych 60 minut, a wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 6.17 i 6.18.



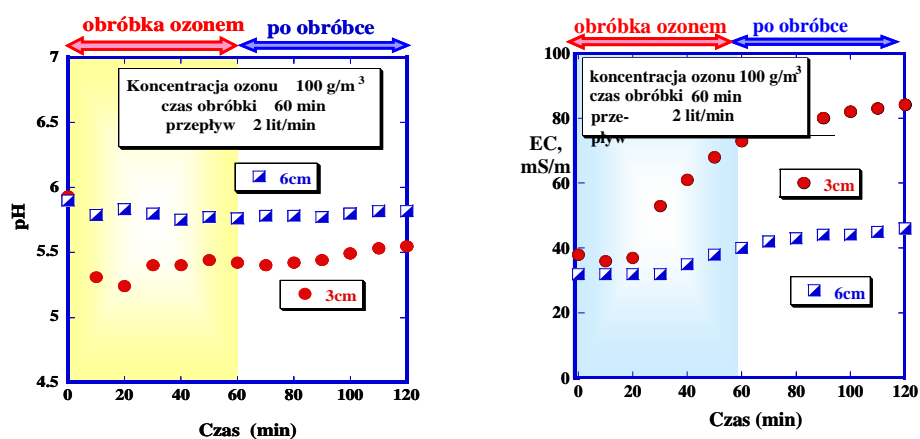
Rys. 6.17. Zmiany pH gleby (a) oraz EC i temperatury gleby (b) w czasie wprowadzania do gleby ozonu – 60 min obróbki ozonem i następnie 60 min po obróbce



Rys. 6.18. Zmiany pH (a), EC i temperatury gleby (b), w czasie wprowadzania do gleby tlenku azotu NO – 60 min obróbki NO i następnie 60 min po obróbce

Po 40 minutach od wprowadzenia ozonu do próbki gleby (rys. 6.17), zaobserwowano skokowe zmniejszenie pH w odległości 3 cm od dyszy dozującej ozon, które następnie stopniowo wzrastało. Podobne zjawisko obserwowano przy wprowadzaniu do gleby NO (Rys. 6.19a), ale po 20 minutach od rozpoczęcia dozowania. Rysunki 6.17b, 6.18b i 6.19b przedstawiają przewodność elektryczną EC próbki gleby, która także wykazuje skokowe zmiany w pierwszych 20 minutach obróbki ozonem/tlenkiem azotu i następnie stopniowo osiąga wartość ustaloną, większą niż przed

obróbką ozonem i mniejszą dla obróbki tlenkiem azotu. Zaobserwowano także, towarzyszące zmianom pH i EC, zmiany temperatury gleby, prawdopodobnie związane z reakcjami egzotermicznymi zainicjowanymi ozonem.

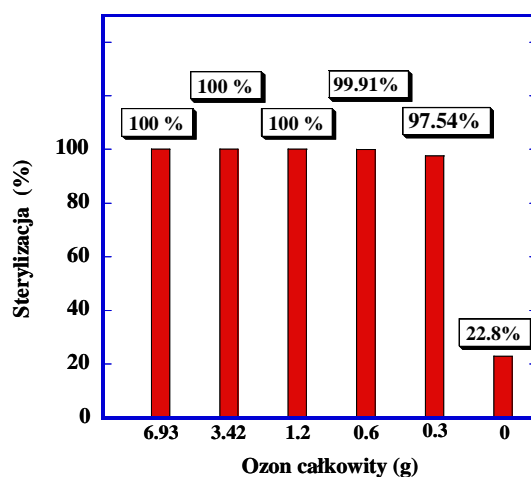


Rys. 6.19. Zmiany pH gleby (a) i jej przewodności EC (b) w czasie i po obróbce ozonem w zależności od odległości od dyszy wprowadzającej ozon do próbki gleby

Badania skuteczności sterylizacji gleby za pomocą ozonu i tlenu azotu przeprowadzono wprowadzając do 50. gramowej próbki gleby zmienne dawki (stężenia) ozonu (0-40 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>) w czasie do 60 minut. Do sterylnych próbek gleby wprowadzano zarodniki grzybów z gatunku *Fusarium Oxysporum* w ilości 10<sup>6</sup> kolonii/ml i następnie po 72 godzinach oznaczano liczbę przetrwalników w jednostkach CFU (jednostek tworzących kolonie – z ang. colony forming units). Całkowitą dawkę ozonu w gramach wyznaczono jako iloczyn koncentracji ozonu, przepływu gazu i czasu trwania obróbki. Przykładowo, w próbce gleby zawierającej początkowo 7,2·10<sup>6</sup> jednostek tworzących kolonie zarodnika grzyba *Fusarium Oxysporum*, po 60 minutach obróbki, w której użyto 6,39 grama ozonu o koncentracji 38,5 g/m<sup>3</sup> przy przepływie gazu 3 lit/min, zmierzono tylko 1,2·10<sup>2</sup> CFU zarodników grzybów. Na rysunku 6.20 przedsta-



wiono stopień sterylizacji próbki gleby w zależności od wypadkowej dawki ozonu w gramach. Jak wynika z rysunku 6.20, oraz z tablicy 6.4 sterylizacja jest skuteczna, jeśli dawka przekracza 0,6 grama ozonu na 50 g gleby. Zarodniki grzyba *Fusarium Oxysporum* zostały niemal całkowicie unieszkodliwione po 10 minutowej obróbce ozonem o stężeniu  $20 \text{ g/m}^3$ . Po 20 minutach obróbki z tą samą dawką ozonu usunięto z gleby 86% bakterii.



Rys. 6.20. Stopień sterylizacji gleby ozonem w zależności od jego całkowitej dawki w gramach (próbka gleby zawierała początkowo od  $4 \cdot 10^6$  ÷  $7 \cdot 10^6$  zarodników grzybów)

W innym eksperymencie, próbki gleby zanieczyszczono nicieniami pasożytującymi na korzeniach roślin (z ang. root-knot nematodes) [203]. Po wprowadzeniu do próbki gleby ozonu o stężeniu  $45 \text{ g/m}^3$  w czasie 20 minut przy przepływie gazu 3 lit/min, nie stwierdzono po eksperymencie żadnych nicieni w objętości próbki gleby (od powierzchni do głębokości 5 cm). Co więcej, po 30 dniach od obróbki ozonem zmierzono zawartość nicieni w glebie, na której posadzono sadzonki melona, i stwierdzono niemal 2-krotne zmniejszenie zawartości nicieni w stosunku do gleby nie poddanej obróbce ozonem.

Analiza procesu obróbki gleby za pomocą ozonu i tlenu azotu, generowanych w nietermicznej plazmie wyładowania barierowego, jest bardzo złożona, bowiem dla zrozumienia zjawisk należy wziąć pod uwagę wiele czynników i parametrów zarówno samej gleby (skład, zawartość zanieczyszczeń nieorganicznych, organicznych i mikro-biologicznych, kwasowość, wilgotność), jak i parametrów plazmy (elektrony, wzbudzone atomy tlenu i azotu, ozon, tlenki azotu, rodniki, promieniowanie ultrafioletowe), oraz parametrów procesu (czas ekspozycji, wielkość dawki ozonu, temperatura).

Tablica 6.5. Sterylizacja gleby ozonem in-situ

	Bakterie	Grzyby Fusarium Oxysporum	
Przed obróbką, CFU/cm <sup>3</sup>	1,8·10 <sup>5</sup>	5,7·10 <sup>6</sup>	
Przepływ gazu, l/min	1	3	
Stężenie, g/m <sup>3</sup>	20	10	20
Czas kontaktu, min	20	10	10
Po obróbce ozonem, CFU/cm <sup>3</sup>	2,78·10 <sup>4</sup>	1,48·10 <sup>5</sup>	1,7·10 <sup>2</sup>
Stopień sterylizacji	86%	97,5%	99,9%

Obecne w glebie, na skutek mikrobiologicznej aktywności bakterii azotowych oraz procesów nawożenia, tlenki azotu reagują z produktami wyładowania barierowego w powietrzu, co wpływa na fizyczne i chemiczne właściwości gleby a tym samym na wzrost roślin. Wstępne badania własne [197÷203, 245] oraz innych autorów [243, 244] potwierdzają, że ozon i tlenki azotu wytwarzane w wyładowaniu barierowym w odpowiednio dobranych dawkach mogą sprzyjać wzrostowi roślin. Przeprowadzona przez badaczy japońskich [259] analiza ekonomiczna obróbki gleby ozonem dla następujących parametrów: koncentracja ozonu 100 g/m<sup>3</sup>, przepływ gazu 2 l/min, czas obróbki 60 min, sprawność generacji ozonu 100 g/kWh, przy aktualnej cenie 1 kWh energii elektrycznej równej 20 centów (wg cen korporacji energetycznej Kyushu w 2008 r),

wykazała, że obróbka 1 m<sup>2</sup> gleby kosztuje około 2 dolary amerykańskie. Jest to koszt konkurencyjny w stosunku do konwencjonalnych chemicznych metod sterylizacji gleby. Biorąc pod uwagę, że metoda sterylizacji gleby ozonem jest przyjazna dla środowiska, a generatory ozonu mogą być zasilane ze źródeł odnawialnych (panele fotowoltaiczne, farmy wiatrowe), należy spodziewać się dalszych badań nad optymalizacją parametrów procesu i następnie szybkiego upowszechnienia tej metody obróbki gleby w praktyce.

## **6.2. Podsumowanie**

Nietermiczna plazma, generowana w wyładowaniach barierowych, jest stosowana w procesach sterylizacji i dezynfekcji mediów stałych, ciekłych i gazowych z uwagi na jej liczne zalety, z których najważniejsze to brak ubocznych, szkodliwych dla środowiska, produktów odpadowych, możliwość prowadzenia obróbki plazmo-chemicznej przy ciśnieniu atmosferycznym i w temperaturach otoczenia. Badania w tej dziedzinie prowadzone są przez wiele ośrodków naukowo-badawczych na świecie. Poszukuje się nowych źródeł plazmy o wysokiej wydajności czasowo-przestrzennej, doskonalone są istniejące konstrukcje reaktorów plazmowych i ich układy zasilania, pojawiają się nowe zastosowania procesów plazmowych w inżynierii środowiska, medycynie, nano- i biotechnologiach. Zastosowanie nietermicznej plazmy w przemyśle rolno-spożywczym do dezynfekcji, przechowywania produktów, stymulacji wzrostu roślin, wydaje się być konkurencyjnym rozwiązaniem w stosunku konwencjonalnych metod chemicznych i w pełni uzasadnione jest kontynuowanie badań w tym zakresie.

## LITERATURA

- [1] EU focus on clean air. Publication of European Commission, 2006
- [2] Roth J. R., Industrial Plasma Engineering. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1995
- [3] Janowski T., Stryczewska H. D., Electrical power losses and efficiency of ozone generator, Polish Journal of Applied Chemistry, vol. XXXIX, 4, PWN Warszawa 1995
- [4] Lesueur H., Czernichowski A., Chapelle J., Apparatus for generation of low temperature plasmas by the formation of gliding arc discharges. Patent Application, France, National registration No 8814932, 1990
- [5] Czernichowski A., Ranaivosoloarimanana A., Janowski T., Stryczewska H.D, Cojan M, Fridman A. A., Plasma-Chemical Processing of CO<sub>2</sub> in a Gliding Arc Reactor Supplied at 50 or 150 Hz, Post-conference Proceedings of The International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO'94, Lublin, 8-9th Sept. 1994, 1994
- [6] Janowski T., Stryczewska H.D., Hybrydowy zasilacz plazmotronu do prowadzenia reakcji chemicznych, Opis patentowy PL 172170, 1993
- [7] International Energy Agency. World Energy Outlook to the Year 2010, Paris 1993
- [8] Uchwała Konferencji Sztokholmskiej z dnia 14.06.1972 roku, dotycząca naturalnego środowiska człowieka. Tekst na stronie internetowej: [http://greenworld.serwus.pl/deklaracja\\_sztokholmska1.htm](http://greenworld.serwus.pl/deklaracja_sztokholmska1.htm)
- [9] UNCED Agenda 21, United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro 1992
- [10] Sustainable Development Report, Manitoba Hydro, Third Edition, 1996, 1997.
- [11] Martenson A., Energy use-for what? In series of booklets from The Baltic University Programme: Energy. From fossil fuels to sustainable energy resources, editor Jurgen Salay Lund University, 1996
- [12] Halit Eren, Environmental Impacts of Technology, J. Webster (ed.), Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering Online, 2001
- [13] Harrison R. M., Pollution-Causes, Effects and Control, Cambridge, UK, 3rd ed. The Royal Society of Chemistry, 1996.
- [14] EU-25 Energy and Transport Outlook to 2030, European Commission, January 2003
- [15] Kołaciński Z., Cedzyńska K., Szymański Ł., Arc plasma towards clean environment, 9th International Conference on Switching Arc Phenomena, Materiały konferencyjne 2001
- [16] Kołaciński Z., Plasma treated waste destruction, ASEM Workshop on Europe-Asia Cooperation on Clean technologies, organized by European Commission and Vietnamese Academy of Science, Hanoi 2004
- [17] Kołaciński Z., Cedzyńska K., Valuable building materials made of plasma vitrified waste, invited lecture for Industrial Workshop at the 17<sup>th</sup> ISPC, Toronto, 2005
- [18] Szymański Ł., Termiczny rozpad i utylizacja odpadów łukiem elektrycznym, Rozprawa doktorska, Łódź 2004

- [19] Praca zbiorowa pod redakcją T. Janowskiego, Nadprzewodnikowe ograniczniki prądów, Lublin 2003
- [20] Praca zbiorowa pod redakcją T. Janowskiego Nadprzewodnikowe zasobniki energii, Lublin 2008
- [21] Arcimowicz, L.A. Czwarty stan materii, Wiedza Powszechna, Warszawa 1972
- [22] Celiński, Z., Plazma, PWN Warszawa 1980
- [23] Orajewski W. N., Plazma na Ziemi i w kosmosie, PWN Warszawa 1989
- [24] Kordus A., Plazma. Właściwości i zastosowania w technice, WNT Warszawa, 1985
- [25] Krall N. A., Trivelpiece A. W., Fizyka plazmy, WNT Warszawa 1979
- [26] Lieberman M.A., Lichtenberg A.J., Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Wiley, New York, 1994
- [27] Non-thermal Plasma techniques for Pollution Control, Part. A: Overview, Fundamentals and Supporting Technologies, edited by M. Penetrante & Shirley E. Schultheis, NATO ASI Series G: Ecological Science, vol.34, part A and B, Springer-Verlag 1993
- [28] Pollo I., OZON. Właściwości, produkcja, zastosowania, Prace Instytutu Matematyki, Fizyki i Chemii, Politechnika Lubelska, Wydawnictwa Uczelniane, Seria A, Nr 4, 1983
- [29] Schalekamp M., Ozone technology in Switzerland yesterday, today and tomorrow, Proceedings of II International Conference on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, HAKONE'89, ed. By Technical University of Lublin, 1989
- [30] Vasiliev M., Vasilieva T., Electron-beam plasma in the production of bioactive agents and drugs, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 57, 2005
- [31] Ebihara K., Takayama M., Ikegami T., Stryczewska H.D., Gyoutoku Y., Yokoyama T., Gunjikake N., Mizukami H., Araki S., Tachibana M., Sakai T., Soil Sterilization Using Ozone Generated By Dielectric Barrier Discharge, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 64, 2005
- [32] Pacheco M., Moreno H., Pacheco J., Automotive toxic gases removal by non thermal plasma, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 110, 2005
- [33] Girard-Lauriault P.-L., Mwale F., Iordanova M., Demers C., Desjardins P., Lerouge S., Wertheimer M.R., Atmospheric Pressure Deposition of Micro-Patterned N-rich Plasma-Polymer Films for Tissue Engineering, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 133, 2005
- [34] Grossmannová H., Krčma F., Slánská K., VOC Destruction in Atmospheric Pressure Plasma Discharge, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 158, 2005
- [35] Li Ke, Chen Jie-rong, Mo Xiao-yan, Li Ru, Li Ying, Study of non-thermal plasma on the efficacy and mechanisms of indoor air sterilization, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 203, 2005

- [36] Moreau M., Feuilloy M.G.J., Meylheuc T., Chevalier S., Orange N., Brisset J. L, Bio-decontamination by Gliding Arc Discharges: Application to the treatment of *Erwinia carotovora atroseptica* 1526, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 297, 2005
- [37] Lock E.H., Saveliev A.V., Kennedy L.A., Removal of Methanol and Dimethyl Sulfide by Pulsed Corona Discharge: Energy Efficiency and Byproducts Formation, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, , CD-rom, paper No 306, 2005
- [38] Brocilo D. et al, Removal of NO<sub>x</sub> and dust particles from exhaust of diesel engine power generator by plasma-catalyst system, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 544, 2005
- [39] Gallagher M. J., Gutsol A., Friedman G., Fridman A., Non-Thermal Plasma Applications in Air-Sterilization, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper 729, 2005
- [40] Akishev Yu., Grushin M., Karalnik V., Trushkin N., Kholodenko V., Chugunov V., Kobzev E., Zhirkova N., Irkhina I., Atmospheric pressure non-thermal plasma sterilization of microorganisms in liquids and on the surfaces, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 262, 2007
- [41] Vaze N. D., Gallagher M. J., Vasilets V. N., Anandan S., Gutsol A., Milovanova T. N., Fridman A., Air Sterilization Using Non-Thermal Plasma , Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 320, 2007
- [42] Arjunan K. P., Vasilets V., Gutsol A., Anandan S., Cho Y., Fridman A., Water sterilization using a Pulsed Spark Plasma Discharge, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 330, 2007
- [43] Vrajova J., Novotny O., Cech J., Krcma F., Stahel P., Plasma Based Removal of Microbial Contamination of Paper, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 489, 2007
- [44] Silla V., Munz R. J., The treatment of Li-ion battery waste in a transferred arc plasma reactor, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 319, 2005
- [45] Sekiguchi H., Nakanishi S., Murakami M., Arimatsu H., Application of Atmospheric Microwave Pure Steam Plasma to Treatment of Plastic Wastes, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 469, 2005
- [46] Lopez L. C., Gristina R., Favia P., d'Agostino R., Covalent immobilization of biological molecules on various plasma modified polymers , Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, No 343, 2005
- [47] Motret O., Aubry O., Thuillier C., Lascaud M., Met C., Cormier J-M., Destruction of ethylene by pulsed dielectric barrier discharge in dry and wet air – parametrical study Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, No 578, 2005

- [48] Khacef A., Cormier J. M., Removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from synthetic glass industry exhausts with pulsed dielectric barrier discharge, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 590, 2005
- [49] Chen Chih-Wei, Lee How-Ming, Chang Moo Been, Chen Shiau-Huei, Inactivation of Aquatic Microorganisms in Water by Pulsed Discharges, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No 94, 2007
- [50] Moreau M., Feuillolley M.G.J., Meylheuc T., Chevalier S., Orange N., Brisset J. L., Bio-decontamination by Gliding Arc Discharges: Application to the treatment of *Erwinia carotovora atroseptica* 1526, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 297, 2005
- [51] Perucca M., Pirri C.F., Mandracchi P., Carossa C., Ceruti P., Growth of amorphous thin-films on dental prostheses for the improvement of their performance, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 655, 2005
- [52] Akitsu T., Ohkawa H., Ohhashi W., Murayama H., Katayama-Hirayama K., Experimental Comparison of Antibacterial Effect in Cold Plasmas at Normal Atmospheric pressure, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 173, 2007
- [53] Iseki S., Aomatsu A., Ohta T., Ito M., Kano H., Higashijima Y., Hori M., Sterilization of *Penicillium digitatum* Using Non-equilibrium Atmospheric Pressure Plasma, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 204, 2007
- [54] Fridman G., Shereshevsky A., Balasubramanian M., Peddinghaus M., Brooks A., Gutsol A., Vasilets V., Fridman A., Friedman G., Sterilization of Living Human and Animal Tissue by Non-Thermal Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 536, 2007
- [55] Kalghatgi S., Fridman G., Nagaraj G., Peddinghaus M., Balasubramanian M., Brooks A., Gutsol A., Vasilets V., Fridman A., Friedman G., Mechanism of Blood Coagulation by Non-Equilibrium Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 614, 2007
- [56] Creyghton Y., Huijser T., Broekhuijsen M., Pulsed RF plasma sterilization of medical packaging, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 769, 2007
- [57] Kalita V., et al, Plasma deposited composite bioactive porous coatings for intrabone implants, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 535, 2005
- [58] Perucca, C.F. Pirri, P. Mandracchi, C. Carossa, P. Ceruti, Growth of amorphous thin-films on dental prostheses for the improvement of their performance, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 655, 2005
- [59] Vasiliev M., Vasilieva T., Electron-beam plasma in the production of bioactive agents and drugs, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 57, 2005

- [60] d'Agostino R., Favia P., Sardella E., Nardulli M., Lopez L., Pistillo B.R., Gristina R., Plasma Tuning of Surface Chemistry for Driving Cell Behavior, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 261, 2007
- [61] Iseki S., Aomatsu A., Ohta T., Ito M., Kano H., Higashijima Y., Hori M., Sterilization of *Penicillium digitatum* Using Non-equilibrium Atmospheric Pressure Plasma, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 204, 2007
- [62] Cocuzza M., Bianco S., Ferrero S., Giuri E., Pirri C.F., Ricci A., Piacenza G., Perucca M., Bich D., Schina P., Meriardo A., Amorphous thin-films grown by plasma techniques for biological analysis, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 656, 2005
- [63] Fridman G. et al, Use of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma Discharge for Coagulation and Sterilization of Surface Wounds, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 665, 2005
- [64] Райзер Ю.П., Физика газозарядки, Наука, Москва, 1992
- [65] Lidmanowski W., Zarys teorii wyładowań w dielektrykach, WNT Warszawa 1988
- [66] Praca zbiorowa pod redakcją R. Kosztaluka, Technika badań wysokonapięciowych, tom 2, WNT Warszawa 1985
- [67] Gherardi N, Gouda G, Gat E, Ricard A, and Massines A, Transition from glow silent discharge to micro-discharges in nitrogen gas, Plasma Sources Sci. Technol. vol. 9, pp. 340-346, 2000
- [68] Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., van der Mullen, J., Gas discharge plasmas and their applications, Spectrochimica Acta, Part B 57, 2002
- [69] Dors M., Mizeraczyk J., NO<sub>x</sub> removal from flue gas in a corona discharge catalyst hybrid system, Catalysis Today, 89, 127-133, 2004
- [70] Rajch E., Jaworek A., Sobczyk A.T., Krupa A, Comparative Studies Of DC Corona and Back Discharges in Different Gases, Czech. J. Phys., 56, Suppl. B, B803-B808, 2006
- [71] Hulka L., Pietsch G. J., Influence of Dimensions and Materials of Coplanar Arrangements on Ozone Production, Plasma Process Polym. 2, 2005
- [72] Pietsch G. J., Gibalov V. I., Pure & Appl. Chem., vol. 70, no. 6, 1169, 1998
- [73] Yasuoka Y., Endo Y., Ishii S., Experimental Study on Ozone Generation Using DC Driven Micro-Plasma, Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2003
- [74] Kanazawa S., Kogoma M., Okazaki S., Moriwaki T., Stable glow plasma at atmospheric pressure, J. Phys. D: Appl. Phys. 21, 1988
- [75] Okazaki S., Kogoma M., Uehara M., Kumura Y., Appearance of a stable glow discharge in air, oxygen and nitrogen at atmospheric pressure using a 50 Hz source, J. Phys. D: Appl. Phys. 26, 1993
- [76] Kogoma M., Okazaki S., Raising of ozone formation efficiency in a homogeneous glow discharge plasma at atmospheric pressure, J. Phys. D: Appl. Phys. 27, 1994



- [77] Kanazawa S., Kogoma M., Okazaki S., Moriwaki T., Glow plasma treatment at atmospheric pressure for surface modification and film deposition, *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. B* 37–38, 1989
- [78] Yokoyama T., Kogoma M., Okazaki S., Moriwaki T., The mechanism of the stabilization of glow plasma at atmospheric pressure, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 23, 1990
- [79] Okazaki S., Formation of atmospheric pressure plasma by mesh electrodes and my desire for its development, *Transaction of the Material Research Society of Japan* 30, 2005
- [80] Laroussi M, Alexeff A, Richardson J P, and Dyer F F “ The Resistive Barrier Discharge , *IEEE Trans. Plasma Sci*, Vol. 30, No. 1, 2002
- [81] Kunhardt E E and Becker K (1999) US Patents 5872426, 6005349, and 6147452
- [82] Pollo I., Selected Design Criteria for Ozone Production, *J. Adv. Oxid. Technol.* Vol. 7, No.1, 2004
- [83] Becker H., Kogelschatz U., Schoenbach K. H., Barker R. J. (Eds.), *Non-equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure*, Taylor & Francis, CRC Press, 2004
- [84] Tepper J., Li P., Lindmayer M., Effects of interface between dielectric barrier and electrode on homogeneous barrier discharges at atmospheric pressure, *Proc. of XIV Intern. Conference on Gas Discharges and their Applications*, Liverpool, 01.-06. Sept., 2002
- [85] Boeck W., Pfeiffer W., *Conduction and Breakdown in Gases*, J. Webster (ed.), Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering online, Copyright © by John Wiley & Sons, Inc, 1999
- [86] Kogelschatz U., Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial applications, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 23, No. 1, March 2003
- [87] Fiala A., Pitchford L. C., Boeuf L. C., Two-dimensional, hybrid model of low-pressure glow discharges, *Phys. Rev. E* 49, 1994
- [88] Janowski T., Stryczewska H. D. and Mizeraczyk J. (Guest Eds) *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, Special Issue on selected papers from International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO'5, vo. 5, no 2, 2006
- [89] Stryczewska H. D., Janowski T., Zastosowania technologii nadprzewodnikowych i plazmowych w energetyce, *Przegląd Elektrotechniczny*, No 7/8, 2003
- [90] Janowski T., Stryczewska H. D., Zasilacz plazmotronu do prowadzenia reakcji chemicznych. Opis patentowy PL 172152, 1997
- [91] Ozonek J., *Laboratorium syntezy ozonu. Podstawy procesowe. Pomiarzy elektryczne. Ekotechnologie*, (Ed. I. Pollo), Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1993,
- [92] Ozonek J., *Modelowanie reaktora do syntezy ozonu*, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, 1984
- [93] Kogelschatz U., *Advanced ozone generation*, in: *Process of Water Treatment*, (Ed. S. Stucki) Plenum Press Publisher, 1988

- [94] Janowski, T., Stryczewska, H., Czerwiński, D., Bessho, K., Yamada, S., Model of the plasma reactor supplying system with frequency tripler, The Third MAGDA Conference in Osaka, Japan, 1994
- [95] Janowski, T., Stryczewska, H., Czerwiński, D., Yamada, S., Bessho, K., An Integrated Power Supplying System for a Plasma Reactor. Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics, Vol. 2, No 3, 1994
- [96] Janowski, T., Jaroszyński, L., Stryczewska, H. D., Model of the gliding arc taking into consideration the discharge length changes, Post-conference proceedings of ELMECO'97 Conference, 1997
- [97] Jaroszyński L., Stryczewska H. D., Numerical analysis of AC circuits with electric arc discharge, Prace Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, XX- SPETO-1997
- [98] Stryczewska H i inni, Raport z realizacji projektu badawczego KBN Nr 8 S502 010 05 Zintegrowany układ zasilania reaktorów ozonu, praca niepublikowana, 84 strony, 1995
- [99] Stryczewska, H.D., Design Aspects of Supplying Systems for Plasma Reactors, Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej 236, Elektryka 27, 1994
- [100] Stryczewska, H.D., Janowski, T., Szponder, J., Experimental Investigation of the 250 Hz Supplying System of an Ozonizer, Proceedings of The International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO' 94, Lublin, 8-9th Sept.1994
- [101] Stryczewska H. D., Analiza zintegrowanych zasilaczy elektromagnetycznych w urządzeniach wyładowczych, Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej, ELEKTRYKA, 1996
- [102] Stryczewska H. D., Janowski T., Integrated supplying systems of non-thermal plasma generator, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipment, Brasov, May 15-17, 1996
- [103] Stryczewska H. D., New supply system of the non-thermal plasma reactor with gliding arc. Archives of Electrical Engineering, No 4, 1997
- [104] Stryczewska H. D., Energeticeskaja effektivnost sistem pitania reaktorow plazmennykh, Energetyka No 1-2, 1997
- [105] Stryczewska H. D., Supply systems of non-thermal plasma reactors for environmental applications, Post-conference proceedings of ELMECO'97 Conference, 1997
- [106] Eliasesen B and Kogelschatz U., Modeling and applications of silent discharge plasmas, IEEE Transactions on Plasma Science, 19(6), 309-323, 1991
- [107] Filippov Yu., Emieljanov Yu. M., The electrical theory of ozonizers, Russ. J. Phys. Chem. 33,155-159, 1959
- [108] Mizeraczek J., Jasiński M., Zakrzewski Z., Hazardous gas treatment by atmospheric pressure microwave discharges, Plasma Physics and Control Fusion, 47, Special Issue: invited papers from: 32 European Physical Society Conference on Plasma Physics, B589, B602, 2005
- [109] Kruczinin A. M., Sawicki A., Piece i urządzenia plazmowe, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001
- [110] Collantes R., Gomez T., Identification and Modeling of a Three Phase Arc Furnace for Voltage Disturbance Simulation, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 4, Oct. 1997

- [111] Jang G., Wang W., Heydt G.T., Development of enhanced electric arc furnace models for transient analysis, *Electric Power Components and Systems*, 29(4), 2001
- [112] Montanari G. C., Loggini M., Cavallini A., Pitti L., Zaninelli D., Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electric Networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 4, 1994
- [113] Hudym V. I., Lesnyak Z. V., Mathematical model of electric arc for investigation of thermal electrodynamic processes in steel melting furnaces, *Elektrotechnika i Elektronika*, tom 24, zeszyt 1, 2005.
- [114] Żmudziński W., Analiza metod obliczania parametrów plazmy łukowej w dyszach palników plazmowych, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Lubelska, 2007
- [115] Kamińska A., Analiza zjawisk cieplnych i elektrycznych w plazmotronie oraz obwodzie zasilającym prądu przemiennego w procesie wytwarzania plazmy niskotemperaturowej, *Rozprawy Elektrotechniczne*, Nr 186, 1987
- [116] Gangoli S., Gutsol A., Fridman A., Applications of Gliding Arc as a Source of Atmospheric Pressure Transitional Plasma, 32nd IEEE International Conference on Plasma Science, June 20-23, Monterey, California, 2005
- [117] Radary B., Fulcheri L., Bakken J.A., Flamant G., Fabry F., Influence of the electromagnetic forces on momentum and heat transfer in a 3-phase plasma reactor, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 19, Plenum Press 1999
- [118] Matsuura T., Taniguchi K., Watanabe T., A New Type of Arc Plasma Reactor with Twelve-Phase Alternating Current Discharge for Synthesis of Carbon Nanotubes, *Proceedings of 17th International Symposium on Plasma Chemistry*, Toronto, Canada, August 7-12, 2005.
- [119] Szmidszt-Szałowski K., Górska A., Młotek M., Plasma catalytic conversion of methane by DBD and gliding discharges, *Journal of AOTs*, vol. 9, No 2, 2006
- [120] Diatczyk J., Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Modeling of the temperature distribution in arc discharge plasma reactor, *Journal of AOTs*, vol. 9, No 2, 2006
- [121] Komarzyniec G., Diatczyk J., Stryczewska H. D., Arc Plasma Reactor Power system with 5-Limb Transformer, *Journal of AOTs*, vol. 9, No 2, 2006
- [122] Kossitsyn M., Gutsol A., Fridman A., Generation and Diagnostics of Non-Equilibrium Plasma in Gliding Arc Discharge, *Electronic Proceedings of 16th International Symposium on Plasma Chemistry*, Taormina, Italy, June 22-27, 2003.
- [123] Lesueur, H., Czernichowski, A., Chapelle, J., Apparatus for generation of low temperature plasmas by formation of gliding electric discharges, *Patent Application*, Republique Francaise, National registration no: 8814, 20 May 1990
- [124] Czernichowski, A. and Czech, T., Plasma assisted incineration of some organic vapours in gliding discharges reactor, *Proceedings of the 3rd International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry*, Strasbourg 1991
- [125] Czernichowski, A. and Lesueur, H., Plasma applications to waste treatment, *First Annual INEL Conference*, Idaho Falls, Idaho (USA), 16-17 Jan. 1991

- [126] Czernichowski, A., Lesueur, H., Multi-electrodes high pressure gliding discharges reactor and its application for some waste gas and vapor incineration. Plasma Applied to Waste Treatment, First Annual INEL Conference, Idaho Falls, Idaho (USA), 16-17 Jan. 1991
- [127] Czernichowski, A., Janowski, T., Stryczewska, H.D., Performances of the Supplying Systems for Plasma Reactors, Contributed Papers of 4<sup>th</sup> International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Bratislava, HAKONE IV, 1993
- [128] Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, S. D. Popov, A. V. Surov, Gh. V. Nakonechny, Investigation of voltage and current variations in a multiphase AC electric arc system, 12<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics, Nice, France 25-29 October 2004.
- [129] G. Komarzyniec, Analiza pracy transformatora pięciokolumnowego w układzie zasilania łukowego reaktora plazmowego, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2008
- [130] Nawrowski R., Tomczewski A., Pole temperatury w reaktorze plazmy, II konferencja Naukowo-techniczna Zastosowania komputerów w elektrotechnice, Kiekrz, 1997
- [131] Burm K., Modeling of non-equilibrium Plasma Flow, PhD Thesis, Eindhoven University of technology, 2001
- [132] Kurowski S., Szymański A., Wybrane zagadnienia chemii plazmy. Warszawa, 1975.
- [133] Kamińska-Benmechene A., Wytwarzanie i modelowanie plazmy w plazmotronach łukowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998
- [134] Kruger C. H., Nonequilibrium in confined arc plasmas, Phys. Fluids, nr 7, 1970
- [135] Diatczyk J., Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Determination of the Gliding Arc Discharge Critical Length, 1<sup>st</sup> Central European Symposium on Plasma Chemistry, Gdańsk, May 28 – 31, 2006
- [136] Касабов Г.А., Елисеев В.В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. – М.: Атомиздат, 1973
- [137] Присяжневич І.В., Черняк В.Я., Коротков П.А., Наумов В.В., Бабіч І.Л., Слюсаренко Ю.І., Юхыменко В.В., Зражевский В.А. // Вісник Київ. Ун-ту. Серія: фіз.-мат. Науки, N 1, 2005
- [138] Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы, -М.: Энергоатомиздат, 1985
- [139] Stryczewska H.D., Janowski T., Supply Systems for Non-Thermal Plasma Reactors, The First Polish - Japanese Hakone Group Symposium on Non-Thermal Plasma Processing of Water and Air, Sopot - Poland, 29 - 31 May 2000
- [140] Jaroszyński L., Stryczewska H.D., Numerical Analysis of the Integrated Supply System of Glidarc Plasma Reactor, Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO, Nałęczów, 04 - 06 czerwca 2000
- [141] Jaroszyński L., Stryczewska H.D., Computer Simulation of the Electric Discharge in Glidarc Plasma Reactor, Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO, Nałęczów, 04 - 06 czerwca 2000
- [142] Jaroszyński L., Analiza plazmowego reaktora łukowego wykorzystującego nieliniowość magnetowodów transformatorów układu zasilającego, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin, 2000

- [143] Stryczewska H.D., Janowski T., Integrated Supply System of the Plasma Reactor Energised from Three Phase Supply Network, International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry HAKONE VII, Greifswald Germany, September 10 - 13 2000
- [144] Jaroszyński L., Stryczewska H.D., Analiza numeryczna urządzeń wyładowczych na przykładzie reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej Nr 37, Seria Konferencje Nr 12, Wrocław 2000
- [145] Berger S., Mathematical approach to model rapidly elongated free-burning arcs in air in electric power circuits, ICEC 2006, 6-9 June 2006, Sendai, Japan, 2006.
- [146] Stryczewska H.D., Jaroszyński L., Modelowanie numeryczne wyładowań łukowych na przykładzie reaktora plazmowego Glidarc, Seminarium Sekcji Wielkich Mocy i Wysokich Napięć Komitetu Elektrotechniki PAN, Lublin 19-11-2000
- [147] Stryczewska H. D., Elektromagnetyczny układ zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, Politechnika Lubelska, seria Elektryka, Wydawnictwa Uczelniane, s. 146, 1998
- [148] Stryczewska H.D., Układ zasilania reaktorów plazmy nietermicznej, Patent, P 317110, 2000,
- [149] Stryczewska H.D., Jaroszyński L., Plasma Processes in New Technologies of Water and Air Cleaning, II International Symposium: New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, NEET, Kazimierz Dolny, 2001
- [150] Jaroszyński L., Stryczewska H.D., The Numerical Model of the Gliding Arc Discharge, II International Symposium: New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation, Kazimierz Dolny, 2001
- [151] Janowski T., Jaroszyński L., Stryczewska H.D., Modification of the Mayr's Electric Arc Model for Gliding Arc Analysis, XXVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Nagoya, Japan, July, 17-22, 2001
- [152] Stryczewska H.D., Janowski T., Mathematical Modelling of the Gliding Arc Discharges, The Second Polish-Japanese Group Symposium on Non-thermal Plasma Processing of Water and Air, Nagoya, Japan, July, 22-23, 2001
- [153] Janowski T., Jaroszyński L., Stryczewska H.D., Modeling of the Ignition Voltage in a Gliding Discharge Power System Based of Non-linear Transformers, X International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering ISEF, Kraków 2001
- [154] Stryczewska H. D., Janowski T., Reactive Power of the Ozone Generators, International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry HAKONE, Estonia - Puhajarve, vol. 2, 2002,
- [155] Stryczewska H. D., Janowski T., Energy Efficiency of Power Systems of Plasma Reactors with Gliding Arc, Joint Conferences 16th European Conference on Atomic & Molecular Physics of Ionized Gases and 5th International Conference on Reactive Plasmas ESCAMPIG, France – Grenoble, vol. 2, 2002
- [156] Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Gliding Arc Discharge in the Triple-Electrode System, VIIth Polish National Symposium on Plasma Chemistry, Kazimierz Dolny, 2002

- [157] Stryczewska H. D., Jaroszyński L., Modelling of the Gliding Arc Discharges Applied in Technologies of Environment Protection, Polish Journal of Chemical Technology, Szczecin, 2002
- [158] Janowski T., Stryczewska H. D., Zastosowanie technologii nadprzewodnikowych i plazmowych w energetyce, Przegląd Elektrotechniczny, nr 9, 2003
- [159] Stryczewska H. D., Diatczyk J., Numerical Model of Temperature Distribution for Arc Plasma, 4th International Conference: Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection - ELMECO-4, Naęczów, Poland, 2003
- [160] Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Transformer Supply System of Plasma Reactors, 4th International Conference: Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection - ELMECO-4, Naęczów, Poland, 2003
- [161] Stryczewska H. D., Janowski T., Zastosowania technologii nadprzewodnikowych i plazmowych w energetyce, IV Seminarium Zastosowania Nadprzewodników, Lublin – Naęczów 2003
- [162] Stryczewska H. D., Janowski T., Komarzyniec G., Diatczyk J., Multi-stage Gliding Arc Reactors for Environmental Applications, International COE Forum on Plasma Science and Technology, Nagoya, Japan, 5-7 April 2004
- [163] Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Diatczyk J., Reaktory plazmowe z łukiem elektrycznym jak źródło nietermicznej plazmy dla celów technologicznych, Konferencja: Zrównoważone Systemy Energetyczne – Nowe Kierunki Wytwarzania i Wykorzystania Energii, Zakopane, 12 – 14 października 2005
- [164] Wac-Włodarczyk A., Stryczewska H. D., Mazurek P., Komarzyniec G., Analiza zaburzeń elektromagnetycznych emitowanych przez urządzenia plazmowe, XXVIII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC-SPETO, Gliwice – Ustroń 2005
- [165] Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Diatczyk J., Janowski T., Multi-electrode Gliding Arc Plasma Reactors Powered from Special Transformers, The 17th International Symposium on Plasma Chemistry, Toronto – Kanada, August 7th - 12th, 2005
- [166] Stryczewska H. D., Ebihara K., Badania i edukacja w zakresie wykorzystania technologii plazmowych na Uniwersytecie Kumamoto w Japonii, Wiadomości Elektrotechniczne, 05 2005
- [167] Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Diatczyk J., 5-limb Transformer as a Power System of Arc Plasma Reactors, International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Naęczów – Poland, 2005
- [168] Diatczyk J., Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Modelling of Plasma Temperature Distribution, International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Naęczów – Poland, 2005
- [169] Stryczewska H. D., Arc Discharge Reactors Powered by Special Transformers, International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Naęczów – Poland, 2005

- [170] Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Diatczyk J., Power Systems of Gliding Arc Reactors for Industrial Applications, XXVIIth International Conference on Phenomena in Ionized Gases ICPIG, Eindhoven, The Netherlands, July 18 - 22 2005
- [171] Diatczyk J., Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Numerical Simulation of Temperature Distribution of Gliding Plasma Reactor, XXVIIth International Conference on Phenomena in Ionized Gases ICPIG, Eindhoven, The Netherlands, July 18 - 22 2005
- [172] Stryczewska H. D., Janowski T., Nalewaj K., Technologie plazmowe i nadprzewodnictwo, Nowe kierunki wytwarzania i wykorzystania energii: Zrównoważone systemy energetyczne - monografia, rozdział 6, 2005
- [173] Janowski T., Stryczewska H. D., Power Supply Systems of Ozone Generators with Magnetic Frequency Multipliers, Journal of Advanced Oxidation Technologies, vol. 9, no 2, July 31, 2006
- [174] Diatczyk J., Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Modeling of the Temperature Distribution in Arc Discharge Plasma Reactor, Journal of Advanced Oxidation Technologies, vol. 9, no 2, July 31, 2006
- [175] Komarzyniec G., Diatczyk J., Stryczewska H. D., Arc Plasma Reactor Power System with 5-Limb Transformer, Journal of Advanced Oxidation Technologies, vol. 9, no 2, July 31, 2006
- [176] Stryczewska H. D., Janowski T., Non-Thermal Plasma Reactors Power Systems' Designing and Efficiency, 10th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry – HAKONE X, Saga, Japan, September 4 – 8, 2006
- [177] Janowski T., Stryczewska H. D., Power and Efficiency of the Gliding Arc Plasma Reactors, 22nd Symposium on Plasma Physics and Technology, Praha, Czech Republic, June 26 – 29, 2006
- [178] Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Janowski T., Five Limb Transformer as a Power System of Arc Discharge Reactor, 3rd Polish-Japanese Hakone Group Symposium on Non-Thermal Plasma Processing of Water and Air, Saga, Japan, September 4 – 8, 2006
- [179] Janowski T., Stryczewska H. D., Higher Magnetic Flux Harmonics of Transformer Core for Ignition the Discharge in the Arc Plasma Reactor, XIX Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, Maribor, Slovenia, June 28 – 30, 2006
- [180] Stryczewska H. D., Jabłońska O., Chaotic Behavior of the Electrical Circuit with Gliding Arc Discharge, 1st Central European Symposium on Plasma Chemistry, Gdańsk, May 28 – 31, 2006
- [181] Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Janowski T., Diatczyk J., Special Transformers in Power Systems of Arc Plasma Reactors, 1st Central European Symposium on Plasma Chemistry, Gdańsk, May 28 – 31, 2006,
- [182] Diatczyk J., Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Determination of the Gliding Arc Discharge Critical Length, 1st Central European Symposium on Plasma Chemistry, Gdańsk, May 28 – 31, 2006
- [183] Stryczewska H. D., Technologiczne zastosowania nietermicznej plazmy, VI Seminarium Naukowe: Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki WZEE 2006, Kazimierz Dolny 8 – 10 maja 2006

- [184] Stryczewska H. D., Sikorski A., Ruszczyk A., Komarzyniec G., Gliding arc plasma reactor supplied from AC/DC/AC inverter, 18th International Symposium on Plasma Chemistry, Kyoto, Japan, August 26 – 31, CD 2007
- [185] Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Gnapowski E., Experimental investigations of the barrier discharge reactor with mesh and porous dielectric, International Workshop Ozotech, Bratislava, Slovakia, 25th – 27th November 2007
- [186] Diatczyk J., Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Warunki generacji nietermicznej plazmy w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej – Nauki Techniczne – Elektryka (Konferencja Modelowanie i sterowanie procesów elektrotermicznych), Kielce, 24 – 26 września 2007
- [187] Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Janowski W., Diatczyk J., Wpływ elektrycznych parametrów układu zasilania na charakterystyki reaktorów plazmy łukowej, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej – Nauki Techniczne – Elektryka (Konferencja Modelowanie i sterowanie procesów elektrotermicznych), Kielce, 24 – 26 września 2007
- [188] Stryczewska H. D., Technologie plazmowe w procesach oczyszczania wody i powietrza, IV Konferencja Naukowa: Postępy w Elektrotechnologii, Jamrozowa Polana, 14 - 15 września 2000
- [189] Stryczewska H. D., Ebihara K., Gyoutoku Y., Tachibana M., Non-Thermal Plasma Based Technology for Soil Sterilization 9th International Conference High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry, Padova, Italy, August 23-34, 2004,
- [190] Stryczewska H. D., Ebihara K., Ikegami T., Janowski T., Gas plasma assisted soil sterilization in the afterglow of dielectric barrier discharges generated in air, International COE Forum on Plasma Science and Technology, Nagoya, Japan, 5-7 April 2004
- [191] Ebihara K., Shibuya Y., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., Kubo K., Tachibana M., Soil treatment Process Using Ozone and NO generated by Electrical Discharges, Proceedings of 21st Symposium on Plasma Processing, SPP-21, Hokkaido, Japan, Jan. 28th –30th, 2004
- [192] Takayama M., Ebihara K., Stryczewska H. D., Ikegami T., Gyoutoku Y., Kubo K., Tachibana M., Ozone Generation by Dielectric Barrier Discharge for Soil Sterilization, The 7th APCPST (Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology)& 17th SPSM (Symposium on Plasma Science and Materials) Conference, Fukuoka, Japan, June 29 – July 2, 2004
- [193] Stryczewska H. D., Ebihara K., Takayama M., Gyoutoku Y., Tachibana M., Non-Thermal Plasma-Based Technology for Soil Treatment, Plasma Processes and Polymers, vol. 2, No 3, March 31, 2005
- [194] Stryczewska H. D., Ebihara K., Janowski T., Zastosowanie nietermicznej plazmy w procesach sterylizacji, Konferencja: Zrównoważone Systemy Energetyczne – Nowe Kierunki Wytwarzania i Wykorzystania Energii, Zakopane, 12 – 14 października 2005



- [195] Ebihara K., Takayama M., Ikegami T., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., Yokoyama T., Gunjikake N., Mizukami H., Araki S., Soil Sterilization Using Ozone Generated by Dielectric Barrier Discharge, The 17th International Symposium on Plasma Chemistry, Toronto – Kanada, August 7th - 12th, CD-R, 2005
- [196] Ebihara K., Takayama M., Ikegami T., Ogata K., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., Sakai T., Development of Agricultural Soil Sterilization Using Ozone Generated by High Frequency Dielectric Barrier Discharge, International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Naęczów – Poland, 4 – 7 September 2005
- [197] Takayama M., Ebihara K., Stryczewska H. D., Ikegami T., Gyoutoku Y., Kubo K., Tachibana M., Ozone Generation by Dielectric Barrier Discharge for Soil Treatment, Thin Solid Film 506 – 507, 2006
- [198] Ebihara K., Takayama M., Ikegami T., Ogata K., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., Sakai T., Development of Agricultural Soil Sterilization Using Ozone Generated by High Frequency Dielectric Barrier Discharge, Journal of Advanced Oxidation Technologies, Vol. 9, no 2, July 31, 2006
- [199] Ebihara K., Takayama M., Stryczewska H. D., Ikegami T., Gyoutoku Y., Tachibana M., Wide Range Concentration Control of Dielectric Barrier Discharge Generated Ozone for Soil Sterilization, The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, vol. 126, no 10, 2006
- [200] Ebihara K., Ikegami T., Takayama M., Ishida H., Sakai T., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., High Dense Ozone Generation and the Supply System for Agricultural Soil Sterilization, 10th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry – HAKONE X, Saga, Japan, September 4 – 8, 2006
- [201] Ebihara K., Ikegami T., Takayama M., Ishida H., Sakai T., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., High Dense Ozone Generation and the Supply System for Agricultural Soil Sterilization, 3rd Polish-Japanese Hakone Group Symposium on Non-Thermal Plasma Processing of Water and Air, Saga, Japan, September 4 – 8, 2006
- [202] Stryczewska H. D., Ebihara K., Ikegami T., Takayama M., Dielectric Barrier Discharge Products as a Soil Processing Environment, 1st Central European Symposium on Plasma Chemistry, Gdańsk, May 28 – 31, 2006
- [203] Stryczewska H. D., Ebihara K., Ikegami T., Takayama M., Products of dielectric barrier discharge in screw and pyramid reactors as a soil processing environment, Transactions of the Institute of Fluid Flow Machinery 119, Gdańsk 2007
- [204] Stryczewska H. D., Nalewaj K., Ebihara K., Plazmowe urządzenia do obróbki wody i gleby zasilane z ogniw fotowoltaicznych, Konferencja: Zrównoważone Systemy Energetyczne – Nowe Kierunki Wytwarzania i Wykorzystania Energii, Zakopane, 12 – 14 października 2005
- [205] Janowski T., Nalewaj K., Stryczewska H. D., Złonkiewicz Z., The Application of Solar Energy in the Conditions of Lublin Region, 4th International Conference: Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection - ELMECO-4, Naęczów, Poland, September 21-24, 2003,

- [206] Stryczewska H. D., Nalewaj K., Solar Energy in the Installations of Swimming Pool Water Treatment, International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Naęczów – Poland, 4 – 7 September 2005
- [207] Nalewaj K., Stryczewska H. D., Modelling Results of the Laboratory Photovoltaic System, International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Naęczów – Poland, 4 – 7 September 2005
- [208] Stryczewska H. D., Janowski T., Installation of Swimming Pools Water Treatment with Ozone Powered from Photovoltaic Panels, 9th International Conference: High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistr, Padova, Italy, August 23-34, 2004
- [209] Stryczewska H. D., Nalewaj K., Janowski T., Stand alone PV system to supply swimming pool water treatment installation, 14th Intern. Sonnenforum, Freiburg, Germany, 2004
- [210] Stryczewska H. D., Wykorzystanie energii słonecznej w technologiach inżynierii ochrony środowiska, Seminarium IPPT Wybrane zagadnienia w tematyce budownictwa niskoenergetycznego, Warszawa, 09-12- 2004
- [211] Stryczewska H. D., Nalewaj K., Energia słoneczna w ozonowaniu wody basenowej, Sport Plus, Nr 1, lipiec 2005
- [212] Janowski T., Magnetyczne potrajacze częstotliwości, Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej 202, Seria ELEKTRYKA 24, Wydawnictwa Uczelniane, s. 114, 1990
- [213] Nafalski A., Bessho K., Yamada S., Sudani T., Performance and Analysis o fan Advanced Type Magnetic Frequency Triplet with Three 3-legged cores, IEEE Trans. On Magnetics, vol. MAG-18, No 6, 1758-1760, 1982
- [214] Stryczewska H. D., Analiza pracy magnetycznego potrajacza częstotliwości jako źródła zasilania odbiornika nieliniowego na przykładzie wytwornicy ozonu, Rozprawa Doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin, 1986
- [215] Rodacki T., A. Kandyda, Energoelektroniczne układy zasilania plazmotronów prądu stałego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [216] Właściwości wieloelektrodowych generatorów plazmy ślizgającego się łuku elektrycznego zasilanych z energoelektronicznych wielofazowych źródeł napięcia i prądu, Projekt badawczy własny MNiSzW, Nr N R01 0012 04, kierownik projektu: H. D. Stryczewska
- [217] Ruszczyk A., Nowe algorytmy predykcyjnych metod regulacji prądów przekształtników AC/DC i DC/AC, Rozprawa doktorska, (promotor prof. A. Sikorski) Politechnika Białostocka, Białystok 2005
- [218] Sikorski A., Problemy dotyczące minimalizacji strat łączeniowych w przekształtniku AC/DC/AC - PWM zasilającym maszynę indukcyjną, Politechnika Białostocka, Rozprawy Naukowe Nr 58, 1998
- [219] Jezierski E., Transformatory. Podstawy teoretyczne, WNT Warszawa 1965
- [220] Turowski J., Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych, WNT Warszawa 1982
- [221] Jabłoński M., Zakrzewski K., Analiza pracy transformatora rozproszeniowego, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 6, 1966

- [222] Nafalski A. Analiza magnetycznych mnożników częstotliwości z rdzeniami pięciokolumnowymi, Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej 165, Seria ELEKTRYKA 10, Wydawnictwa Uczelniane, p. 83, 1987
- [223] Goleman R., Straty mocy w transformatorowym potrajaczu częstotliwości, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin, 1983
- [224] Wac-Włodarczyk A. Analiza pracy magnetycznego dziewięciokrotnika częstotliwości, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1983
- [225] Ciok Z., Modele matematyczne łuku łączeniowego, PWN, Warszawa, 1987
- [226] Ciok Z., Pochanke Z., A method of solving a field equation set for switching arc description, IV Intern. Symp. On Switching Arc Phenomena, Part II, Łódź 1981
- [227] Cowley M. D., Chang S. K., Integral methods of analyzing electric arc. I Formulation & II Examples, J. Phys. Appl. Phys., vol. 7, No 10, 1974
- [228] El-Akkari F. R., Tuma D. T., Simulation of transient and zero current behavior of arc stabilized by forced convection, IEEE Trans. PAS, vol. 96, No 6, 1977
- [229] Hermann W., Kogelschatz U., Raggler K., Schade E., Investigation of the cylindrical axially blown high pressure arc, J. Appl. Phys., vol. 7, No 4, 1974
- [230] Królikowski C., Technika łączenia obwodów elektroenergetycznych, PWN Warszawa, 1990
- [231] Swanson B., Roidt R., Browne T. E., Arc cooling and short line fault interruption, IEEE trans. PAS, vol. 90, No 3, 1971
- [232] Fang M. T. C., Brannen D., A current zero arc model based on forced convection, IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 8, No 1, 1980
- [233] Ghorui S., Sahasrabudhe S. N., Murthy P. S. S., Das A. K., Venkatramani N., Experimental Evidence of Chaotic Behavior in Atmospheric Pressure Arc Discharge, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 28, no. 1, February 2000
- [234] Meirelles M. P., Dupont C. J., Stochastic arc modeling, SAP - 93 7th International Conference on Switching Arc Phenomena, Łódź, Sep. 1993
- [235] Cheung P. Y., Wong A. Y., Chaotic behavior and period doubling in plasmas, Phys. Rev. Lett., vol. 59, no. 5, pp. 551-554, 1987
- [236] Ding W. X., She H. Q., Huang W., Yu C. X., Controlling chaos in a discharge plasma, Phys. Rev. Lett., vol. 72, no. 1, pp. 96-99, 1994
- [237] Jaroszyński L., Stryczewska H.D., Analiza numeryczna urządzeń wyładowczych na przykładzie reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, IV Konferencja Naukowa: Postępy w Elektrotechnologii, Jamrozowa Polana, 14 - 15 września 2000,
- [238] Janowski T., Jaroszyński L., Stryczewska H.D., Modeling of the Ignition Voltage in a Gliding Discharge Power System Based of Non-linear Transformers, X International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering ISEF, Kraków, September, 20-22, 2001
- [239] Janowski T., Stryczewska H. D., Centrum Doskonałości Zastosowań Technologii Nadprzewodnikowych i Plazmowych w Energetyce, Przegląd Elektrotechniczny, 9'2003

- [240] Stryczewska H. D. , Wykorzystanie energii słonecznej w wybranych technologiach inżynierii ochrony środowiska, Wybrane zagadnienia w tematyce budownictwa niskoenergetycznego, Warszawa, 09-12-2004
- [241] Stryczewska H. D., Przegląd badań prowadzonych w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej dotyczących zastosowań nadprzewodnictwa i technologii nietrmicznej plazmy w elektroenergetyce i inżynierii ochrony środowiska, Dni Asocjacji Euratom – IFPILM, Kudowa Zdrój, 18 – 20 września 2007
- [242] Królikowski Cz., Kamińska A., Plazmotrony jednofazowe prądu przemiennego, Przegląd Elektrotechniczny 10/11/12, 1986
- [243] Królikowski Cz., Kamińska A., Warunki palenia się łuku elektrycznego w jednofazowym obwodzie prądu przemiennego, Rozprawy Elektrotechniczne 33, z. 1, 1987
- [244] Królikowski Cz., Namyślak R., Niewiedział R., The direct current arc plasmatrons for toxic substances destruction, Proceedings of the International ELMECO Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection, 1994
- [245] Kruczinin A.M., Sawicki A., Urządzenia elektrotechnologiczne z nagrzewaniem łukowym i plazmowym. Część I: Teoria nagrzewania łukowego i plazmowego, Skrypty Politechniki Częstochowskiej 17, 1997
- [246] Moisan M., Barbeau J., Moreau S., Pelletier J., Tabrizian M., Yahia L'H., Low temperature sterilization using gas plasmas: a review of experiments and an analysis of inactivation mechanisms, Internatioanl Journal of Pharmaceutics 226, 2001
- [247] Ozone gas as a soil fumigant, Research Program , EPRI, Palo Alto, California Energy Commision, Sacramento, TR-113751, 1999
- [248] Trevors J.T., Sterilization and inhibition of microbial activity in soil, Journal of Microbiological Methods 26, 1996
- [249] Stryczewska, H.D., Ebihara, K., Ikegami T., Janowski, T, Gas Plasma Assisted Soil Sterilization in the Afterglow of Dielectric Barrier Discharges Generated in Air, Proc. International COE Forum on Plasma Science and Technology, 5-7 April 2004, Nagoya, Japan
- [250] Mavrogianopoulos G.N., Frangoudakis A., Pandelakis J., Energy Efficient Soil Disinfection by Microwaves, J. Agric. Engng. Res. 75, 2000
- [251] Warriner K., Rysstad G., Murden A., Rumsby P., Thomas D., Waites W.M., Inactivation of Bacillus subtilis spores on packaging surfaces by UV excimer laser irradiation, Journal of Applied Microbiology 88, 2000
- [252] McNamara N.P., Black H.I.J., Beresford N.A., Parekh N.R., Effect of acute gamma irradiation on chemical, physical and biological properties of soil, Applied Soil Ecology 24 , 2003
- [253] Dors M., Metel E., Mizeraczyk J., Marotta E., *Coli* bacteria inactivation by pulsed corona discharge in water, International Journal on Plasma Environmental Science and Technology, 2, 34 37, 2008
- [254] Ozone Gas as a Soil Fumigant: 1998 Research Program, EPRI, Palo Alto, CA, California Energy Commission, Sacramento, CA, TR-113751, 1999
- [255] Moore G., Griffith C., Peters A., Bactericidal properties of ozone and its potential application as a terminal disinfectant, J. Food Prot. 63, 2000

- [256] Moreau S., Moisan M., Tabrizian M., Barbeau J., Pelletier J., Ricard A. Yahia L'H., Using the flowing afterglow of a plasma to inactivate *Bacillus subtilis* spores: Influence of the operating conditions, *J. Appl. Phys.*, Vol. 88, No. 2, 2000
- [257] Roland U., Holzer F., Kopinke F.-D., Improved oxidation of air pollutants in a non-thermal plasma, *Catalysis Today* 73, 2002
- [258] Krawczyk K., Ulejczyk B., Decomposition of Chloromethanes in Gliding Discharges, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 23, No. 2, June 2003
- [259] Ebihara K., Ikegami T., Mitsugi F., Ikegami T, Stryczewska H.D., Gyoutoku Y., Gaseous Ozone Soil Sterilization and Biological Properties, 2008 Taiwan-Japan Bilateral Technology Interchange Project, The Workshop on the Applications of Plasma to Bio-Medical Engineering, Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan, December 15-17, 2008

## SKOROWIDZ

- Aproksymacja 111  
argon 40, 42, 53, 56, 88-91  
azot 64-67
- Bakterie** 22, 34, 186, 190  
bariera dielektryczna 51  
bioodkazywanie 34  
biotechnologie 26, 35, 172
- Charakterystyka** 61, 71, 121, 155, 168  
— magnesowania 92  
— — nieliniowa 71  
— prądowo-napięciowa, 61, 70, 121, 125  
— — statyczna 87, 155, 158, 168  
— — dynamiczna 87, 168  
— przekąźnikowa 71  
— wyładowania 147, 152, 155  
— — łukowego 152, 168  
chłodzenie 64, 84, 150, 179  
— elektrod 84, 140, 179-184  
— łuku 148, 150  
— — powierzchniowe 150  
— wodne 77, 84, 176, 179, 183  
ciśnienie 13, 27, 30, 31, 64, 177, 191  
— atmosferyczne 64, 81, 87, 102  
— gazu 72, 96, 148, 166, 179  
— normalne 89  
cykl pracy 86, 95, 113  
cząsteczki 21, 26, 32, 37, 41, 46  
— gazu 26, 28, 32, 37, 61  
— zjonizowane 29, 147  
częstotliwość  
— charakterystyczna 47  
— elektronowa plazmy 47  
— powtarzania impulsów 50, 68  
— napięcia zasilającego 53, 59-75, 86,  
— techniczna 54, 55, 93  
— próbkowania 92  
— wysoka 60, 64  
— podwyższona 13, 32, 51, 74, 77  
— radiowa 46-48
- Dielektryk** 30, 44-58  
— stały 42, 72-79  
— porowaty 72  
diody RF 47  
dyfuzja 40, 67-68  
dysocjacja 62, 164
- Elektroda**  
— chłodzona 140, 176, 179, 183  
— grafitowa 82  
— kwarcowa 177  
— metalowa 36-41, 74  
— niskonapięciowa 44, 175  
— otulona 134  
— piramidowa 176-185  
— płaska 36  
— robocza 84, 85, 107-122  
— siatkowa 53  
— szklana 185  
— śrubowa 176-185  
— uziemiona 77, 175, 177, 182  
— węglowa 148  
— wyładowcza 61, 82, 183  
— wysokonapięciowa 44, 49, 176-184  
— zapłonowa 84, 85, 88, 113-122  
— zbiorcza 44-45  
elektrofiltry 11, 22, 44  
elementy wyładowcze 65, 78, 135
- Faza** 31, 74, 110, 132, 151  
— ciekła, stała, gazowa 27  
— mikrowyładowań 74  
— nierównowagowa 61, 81-87  
— początkowa 55  
— wyładowań 69  
— zasilania 124  
fazowe przesunięcie 124  
fazowy kąt 124  
fazowa komutacja 131  
figura Lissajous 75  
filamenty 184
- Gazy** 62, 84-86, 90-116, 148-164  
— cieplarniane 11, 14  
— elektronowy 162-164  
— plazmotwórcze 53

- przemysłowe 62
- reaktywne 41
- robocze 31, 87-89, 94, 118, 134, 170
- szlachetne 60, 162
- wylotowe 45, 50
- technologiczne 168
- zjonizowane 29, 147
- geometria 35, 148-163,
- elektrod, 42, 51-57, 85, 176
- komór wyładowczych 42
- — wyłączników prądowych 146
- obszaru plazmy 167
- reaktora plazmowego 88
- wyładowania 30
  
- Harmoniczne** 111-143
- generowane
- — przez łuk 92
- — przez układ zapłonowy 93
- indukowane 142
- kolejności zerowej 123
- napięcia 108, 115
- podstawowa 110, 143
- strumienia magnetycznego 108 - 127
- wyższe 92, 93, 141
- hel 41, 52-59, 82
  
- Impulsy Trichela** 42
- inżynieria tkankowa 34
  
- Jonizacja** 164
- cieplna 150
- jednokrotna 27
- przestrzeni międzyelektrodowej 109
- wielokrotna 27
- wstępna 120
- objętościowa 37
- zderzeniowa 36-37
  
- Komora wyładowcza** 82-84
- koncentracja ozonu 172 -183
  
- Lawina**
- elektronowa 37
- wtórna 37
  
- Ładunek**
- elektronu 46
- elektryczny 44
- powierzchniowy 73-74
- wypadkowy 27
- łuk 61
- ekspansyjny 81-82
- elektryczny 80-82,96
- krótki 86
- intensywnie chłodzony 124
  
- Mechanizm wyładowania** 35, 37, 72
- strimerowy 37
- Towsenda 38, 95
- metale ciężkie 18-24
- mikrowyładowania 64,74, 76
- moc 130, 148,166, 176-183,
- bierna 104, 117, 127-135
- — przesunięcia 135
- chwilowa 156
- czynna 134-141
- dławika 137
- odkształcenia 136-141
- ozonatora 138
- pojedynczego elementu 136
- pozorną 116,138
- — transformatora 116, 136
- wyładowań 104
- znamionowa 137
- modele łuku 148
- deterministyczne 147-150
- dynamiczne 148
- kanałowe 148
- matematyczne 148
- statyczne 148
- stochastyczne 147, 170
- zaciskowe 148
  
- Nadtlenek wodoru (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)** 34, 172
- nanotechnologie 191
- napięcie
- fazowe 92-98, 110
- impulsowe 64
- początkowe 37
- polaryzacji 42

- przewodowe 92-98
- stałe 35
- wysokiej częstotliwości 47, 59, 142
- zapłonu wyładowań 106, 141

**Ozon (O<sub>3</sub>)** 13, 18-23, 25, 50, 53, 174  
obróbka gleby 22,  
ochrona środowiska 10  
odpady  
—niebezpieczne 24  
—przemysłowe 22  
—ściekowe 24  
—toksyczne 23

#### **Parametry**

- eksploatacyjne 142
- elektryczne 72, 88, 148
- gazu 79
- geometryczne elementów  
wyładowczych 78
- — reaktora 179
- gleby 179
- hydrodynamiczne 148
- łuku 148
- plazmy nietermicznej 162-169
- reaktorów plazmowych 57, 72, 178
- technologiczne 88
- termiczne 88
- układu zasilania 31, 77, 79, 88, 170
- wyładowania 58, 72,  
piec plazmowy  
plazma  
— częściowo-zjonizowana 27  
— gorąca 28  
— impulsowa 33  
— nierównowagowa 80-83  
— nietermiczna 30,38  
— niskociśnieniowa 29  
— termiczna 25  
— wysokociśnieniowa 29  
— zimna 53  
plazmotrony łukowe 163  
pole  
— elektryczne 30  
— — jednorodne 35

- elektromagnetyczne 49
- powietrze 20
- prąd

- przesunięcia 74
- fazowy 92-98

#### **procesy**

- chłodzenia 23
- jonizacji 37,67
- — 37
- — 37

próżnia 46, 48, 51

#### **Reaktancja**

- wewnętrzna 128
- zwarcia 143

#### **reaktor**

- plazmowy 82, 84, 117,118, 145
- jednofazowy 84
- trójfazowy 87
- trójelektrodowy 82, 118
- wieloelektrodowy 60-62, 145
- dwunastoelektrodowy 82-84
- sześcielektrodowy 118
- dziewięcioelektrodowy 117

rekombinacja 67

#### **rozkład**

- pola elektrycznego 37, 50
- potencjału 41, 69
- temperatury 81,163-168

#### **równanie**

- Ayrton 148
- Cassiego 150
- Mayra 150
- równowagi 165
- zachowania
- — energii 149, 165
- — masy 165
- — pędu 165

równowaga termodynamiczna 60, 80-83

#### **Schemat zastępczy 100**

siły 18, 57, 162

- gazodynamiczne 84

spalanie 17, 19, 20, 33

sprawność 67-68, 133-142, 146, 182-190



- stopień
  - czystości 60
  - jonizacji 28, 88, 163-165
  - nasycenia 111
  - sterylizacji 189
- sterylizacja 64, 66, 80, 172-176, 188-191
- strimery 38-39
- symulacja 158, 167
  
- Środowisko 8, 9, 18-24, 26, 31-35, 62
  
- Technologie** 8, 10, 17, 24
  - chemiczne 11, 26
  - materiałowe 27
  - plazmowe 12, 14, 17
- technologiczne źródła plazmy 26
- temperatura
  - cząstek plazmy 147
  - elektronów 163
  - gazu elektronowego 162
  - łuku 149
  - obojętnych cząstek plazmy 162
  - przestrzeni wyładowczej 147, 161
- tlenki
  - azotu 18-19, 31-33, 64-66, 174-186
  - manganu 66
  - metali 21
  - siarki 18, 21, 31-33, 69
  - żelaza 66
- Transformator
  - jednofazowy 110, 112
  - pięciokolumnowy 106, 119, 143
  - podwyższający 133
  - roboczy 108-117, 144
  - zapłonowy 120
  
- Układy**
  - chłodzenia 77-84
  - dostarczania gazu 66, 79
  
- energoelektroniczne 104, 134, 145
- impulsowe 32, 45, 62, 105-106
- półprzewodnikowe 130
- transformatorowe 135
- tranzystorowe 104, 130, 145
- trójfazowe 88, 109
- wieloelektrodowe 61, 62
- zasilania 104 - 118
- zintegrowany 105
- upakowanie dielektryczne 72
  
- Wykres fazorowy** 100
- wyładowanie
  - atmosferyczne 27
  - barierowe 13, 26, 33, 51, 68, 127, 130
  - DC 40, 42
  - impulsowe 49, 50
  - jarzeniowe 35, 36, 42, 52
  - katodowe 31
  - koronowe 36, 42 - 46
  - łukowe 13, 60
  - mikrofalowe 30, 60, 62
  - niezupełne 13, 36, 39
    - — kapilarne 60
    - — RF 46,49,50
  - powierzchniowe 43
  - quasi-łukowe 36
  - trójfazowe 84
  - w mikrootworach 55-59
  - wsteczne 44, 45
  - zupełne 36
- wytrzymałość elektryczna 55, 96
  
- VOC 13, 20, 32, 64, 67
  
- Zanieczyszczenia** 8, 16-23, 168
- zapłon wyładowań 55-58, 74-85,106-170
- zderzenia 32
- zrównoważony rozwój 15