

Politechnika Lubelska

Henryka Danuta Stryczewska

**Elektromagnetyczny układ zasilania
reaktorów plazmowych
ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym**

Lublin 1998

OPINIODAWCA:

Czesław Królikowski

Jerzy Mizeraczyk

Tadeusz Skoczkowski

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

ISBN 83-87270-82-2

© Copyright by Politechnika Lubelska 1997

Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej

Nakład 150 egz., F. B5. Ark. wyd. 5,62. Ark. druk. 9,25
Zam. 44/98

Zakład Wydawniczo-Poligraficzny Politechniki Lubelskiej
20-950 Lublin, ul. Bernardyńska 13, tel. 53-222-01

Spis treści

Streszczenie	5
Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	6
1. Wstęp	9
1. 1. Teza i cel pracy	15
2. Reaktory plazmowe jako odbiorniki energii elektrycznej	17
2. 1. Wprowadzenie	17
2. 2. Przegląd wybranych konstrukcji reaktorów plazmowych stosowanych w technologiach oczyszczania toksycznych gazów	20
2. 3. Zasada budowy i działania reaktora plazmowego GlidArc	26
2. 4. Przebiegi prądów i napięć, charakterystyki	29
2. 5. Zależności energetyczne w reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym	32
3. Model matematyczny ślizgających się wyładowań łukowych w reaktorze plazmowym GlidArc	45
3. 1. Wybór modelu	47
3. 2. Model matematyczny układu reaktor plazmowy - źródło	57
3. 3. Wyniki analizy numerycznej	59
4. Charakterystyka układów zasilania reaktorów plazmowych	71
4. 1. Przegląd układów zasilania reaktorów plazmowych	72
4. 2. Analiza mocy i sprawności układów zasilania reaktorów plazmowych	84
5. Zintegrowany układ zasilania reaktorów plazmowych GlidArc	89

5. 1. Zasada działania.....	89
5. 2. Modele układu	104
5. 3. Badania eksperymentalne	109
5. 4. Projektowanie zintegrowanych zasilaczy elektromagnetycznych reaktorów plazmowych.....	116
5. 4. 1. Założenia do projektowania.....	118
5. 4. 2. Materiał na rdzenie transformatorów roboczych	119
5. 4. 3. Indukcja w rdzeniach transformatorów roboczych	120
5. 4. 4. Wymiary rdzeni	121
5. 4. 5. Uzwojenia.....	121
5. 4. 6. Transformator zapłonowy.....	128
6. Podsumowanie.....	131
7. Literatura	137
Streszczenie w języku angielskim	146

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę zjawisk elektromagnetycznych w reaktorach plazmowych, ze ślizgającym się wzdłuż elektrod wyładowaniem łukowym, stosowanych do neutralizacji toksycznych gazów emitowanych do atmosfery. Scharakteryzowano te reaktory plazmowe jako odbiorniki energii elektrycznej i określono wymagania jakie powinny spełniać ich układy zasilania.

Wykazano, że odpowiednie wykorzystanie wyższych harmonicznych odkształconego strumienia magnetycznego transformatora, który jest podstawowym elementem układów zasilających reaktory plazmowe, pozwala budować układy integrujące wszystkie funkcje stosowanych dotychczas układów i spełniające stawiane im wymagania.

W pracy przedstawiono te układy, przeanalizowano ich działanie. Zaproponowano model matematyczny i przeprowadzono obliczenia numeryczne wyładowania łukowego ślizgającego się wzdłuż elektrod. Zbadano wpływ prędkości przepływu gazu i geometrii elektrod reaktora na pracę układu. Rozważania teoretyczne i obliczenia numeryczne zweryfikowano w badaniach eksperymentalnych.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

A_{Fe} –	pole przekroju rdzenia magnetycznego [m^2]
a, b –	współczynniki aproksymacji charakterystyki magnesowania
$B(t)$ –	wartość chwilowa indukcji magnetycznej [T]
B_1, B_3 –	amplitudy pierwszej i trzeciej harmonicznej indukcji [T]
D –	moc odkształcenia [$V \cdot A$]
E –	gradient napięcia łuku [$\frac{V}{m}$]
e_z –	siła elektromotoryczna, napięcie zasilające [V]
f_1, f_2 –	częstotliwość na wejściu i wyjściu zasilacza [Hz]
G –	konduktancja dynamiczna jednostki długości kolumny łukowej [S]
$g(t)$ –	dynamiczna konduktancja wyładowania łukowego [S]
G_{st} –	statyczna konduktancja łuku [S]
i_l –	natężenie prądu łuku [A]
j –	gęstość prądu [$\frac{A}{m^2}$]
L_k, L_j –	długości kolumny i jarzma obwodu magnetycznego zasilacza [m]
l_{Fe} –	średnia długość obwodu magnetycznego transformatora [m]
l_o –	długość łuku w miejscu zapłonu [m]
l_l –	długość kolumny łukowej [m]
M_{Fe} –	masa rdzenia [kg]
M_u –	masa uzwojeń [kg]
n –	liczba naturalna, krotność częstotliwości sieciowej

N_1, N_2	liczba zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego transformatora
ΔP	straty mocy [W]
P, Q	moc czynna i bierna [W], [var]
P_l	moc czynna łuku [W]
$P_{\text{źr}}$	moc czynna źródła zasilania [W]
Q_D	moc bierna dławików [var]
Q	energia wewnętrzna kolumny łukowej [J]
R_1, R_2	rezystancja uzwojeń pierwotnych i wtórnych transformatora [Ω]
R_l	statyczna rezystancja łuku [Ω]
S	moc pozorna [V · A]
s_{u1}, s_{u2}	powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu uzwojenia odpowiednio pierwotnego i wtórnego zasilacza [m ²]
S_1, S_2	moc pozorna strony pierwotnej i wtórnej zasilacza [V · A]
S_T	moc pozorna transformatora [V · A]
S_l	moc pozorna wyładowania łukowego [[V · A]
t	czas [s]
T, T_c	odpowiednio okres napięcia zasilającego i czas trwania cyklu pracy reaktora plazmowego [s]
u_l	napięcie łuku [V]
U_2	wartość skuteczna napięcia wtórnego zasilacza [V]
U_{20}	napięcie stanu jałowego zasilacza [V]
U_{NNI}	różnica potencjałów między punktem neutralnym sieci zasilającej a punktem neutralnym gwiazdy uzwojeń pierwotnych transformatorów zasilacza [V]
v_g	prędkość przepływu gazu w reaktorze plazmowym [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]
x	stosunek rezystancji łuku R_w do impedancji wewnętrznej Z_w źródła
x_w	stosunek reaktancji wewnętrznej źródła X_w do wypadkowej impedancji Z obwodu z wyładowaniem łukowym
X_w	reaktancja wewnętrzna źródła zasilania [Ω]
X_z	reaktancja zwarcia zasilacza [Ω]

Z –	impedancja wypadkowa obwodu z łukiem [Ω]
Z_w –	impedancja wewnętrzna zasilacza [Ω]
η –	sprawność elektryczna zasilacza
η_l –	sprawność łuku, określona stosunkiem mocy czynnej łuku do mocy czynnej źródła
λ –	współczynnik mocy
λ_w –	stosunek rezystancji wewnętrznej źródła R_w do jego impedancji Z_w
λ_l –	współczynnik mocy łuku, wyrażony stosunkiem rezystancji łuku R_l do wypadkowej impedancji źródła Z
$\omega=2\pi f$ –	pulsacja [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$]

1. Wstęp

Wyładowania w postaci łuku elektrycznego towarzyszyły człowiekowi od niepamiętnych czasów, jednak dopiero 200 lat temu zdołano wytworzyć po raz pierwszy wyładowanie łukowe między elektrodami węglowymi, a po kolejnych 100 latach William Siemens, budując w 1880 r. pierwszy piec łukowy, zapoczątkował powszechne obecnie zastosowanie wyładowań łukowych w metalurgii, hutnictwie, technologiach chemicznych.

W ostatnich latach wyładowania elektryczne, także w postaci łuku elektrycznego, zaczęto stosować w inżynierii ochrony środowiska. W tej dziedzinie technologie wykorzystujące plazmę, w różnych jej postaciach, są jednak wciąż na etapie badań. Techniki plazmowe oferują nowe podejście do rozwiązywania niektórych problemów ochrony środowiska, takich jak kwaśne deszcze, globalne przegrzanie Ziemi, zubożenie warstwy ozonowej, smog. Dziedzina ta zaczęła rozwijać się szczególnie intensywnie w ostatnich kilku latach. Powstają nowe rodzaje reaktorów plazmowych, a istniejące są usprawniane i doskonalone.

Powstający w wyniku wyładowań elektrycznych zjonizowany gaz, ze względu na jego charakterystyczne właściwości, odmienne od fazy stałej i ciekłej, określany jest jako czwarty stan skupienia materii. Plazmę

wytwarza się najczęściej przez wyładowania elektryczne w gazie, w urządzeniach zwanych reaktorami plazmowymi. Są to urządzeniami technologiczne, bowiem plazmy nie można przechowywać ani transportować i musimy ją wytwarzać w miejscu, w którym jest wykorzystywana w procesie technologicznym. Stopień jonizacji gazu i odpowiadające mu temperatury plazmy mogą się znacznie różnić. Plazmę o temperaturze powyżej 1000 K wykorzystuje się w obróbce metali i metalurgii, natomiast w procesach chemicznych stosuje się zwykle plazmę „zimną” (nietermiczną) o temperaturze do kilkuset kelwinów, w której średnia energia elektronów jest znacznie większa od energii cząsteczek otaczającego ją gazu. Większa część energii elektrycznej reaktora plazmy nietermicznej wykorzystywana jest na wytwarzanie wysokoenergetycznych elektronów a nie na podgrzewanie gazu w całej jego objętości. Energia plazmy jest zużywana na dysocjację wywołaną zderzeniami z elektronami i jonizację gazu w celu wytworzenia wolnych rodników, umożliwiających prowadzenie pożądanych reakcji chemicznych np. w celu wytworzenia ozonu, jak ma to miejsce w generatorach ozonu [29], [61], bądź do rozkładu toksycznych cząsteczek oczyszczanego gazu, w reaktorach plazmowych [7], [8], [20], [48], [66].

Technologie utylizacji toksycznych gazów wykorzystujące plazmę, wytwarzaną wyładowaniami elektrycznymi, opracowano w ostatnich latach [7], [8], [17], [20], [22]. Plazmowa obróbka gazów, jako bezodpadowa i stosunkowo tania, jest stosowana coraz częściej [17], [19], [42], [49], [59], [75]. Toksyczne gazy powstające w różnych procesach technologicznych, jak malowanie, spalanie, uboczne produkty procesów che-

micznych i inne, są odprowadzane w dużych objętościach do atmosfery przy ciśnieniu bliskim atmosferycznemu.

Przy usuwaniu bardzo rozcieńczonych substancji zanieczyszczających powietrze, zastosowanie plazmy nietermicznej wydaje się być najbardziej odpowiednie, ze względu na selektywność energii. W innych zastosowaniach, tam gdzie występują różne rodzaje odpadów, wykorzystuje się plazmę termiczną do całkowitego ich spalania, łącznie z pojemnikiem, a następnie plazmę nietermiczną do oczyszczenia gazów powstałych w procesie spalania [66].

Istnieje już wiele typów reaktorów plazmy nietermicznej wykorzystywanych w procesach związanych z ochroną środowiska. Potencjalne możliwości tych urządzeń potwierdzono niejednokrotnie przy usuwaniu tlenków azotu NO_x , dwutlenku siarki SO_2 z gazów spalinowych, metali ciężkich i lotnych substancji organicznych w gazach przemysłowych [22], [60], [62].

Nietermiczna plazma może być wytwarzana na skalę przemysłową w zasadzie dwojako: przez napromieniowanie wiązką elektronową [66] (zwana metodą „electron-beam”) oraz poprzez wyładowania elektryczne [5]. Zastosowanie pierwszej metody do produkcji plazmy wiąże się z dużymi kosztami dział elektronowych oraz z ryzykiem szkodliwego napromieniowania promieniami X. Stąd poszukiwanie alternatywnych technik plazmowych, takich jak wykorzystanie wyładowań elektrycznych.

Wykorzystywane w technologiach plazmowej obróbki gazów wyładowania elektryczne mogą występować w różnych formach, w zależności od geometrii elektrod i elektrycznego układu zasilania; począwszy od

wyładowań niezupełnych w układach uwarstwionych, poprzez wyładowania koronowe i jarzeniowe, skończywszy na wyładowaniach quasi-łukowych i łukowych. Wiele reaktorów posiada elektrody w kształcie igieł i ostrych krawędzi dla wytworzenia dużych gradientów pola elektrycznego (tak jak w filtrze elektrostatycznym). Reaktory mogą być zasilane napięciem stałym (DC), przemiennym (AC) oraz ze źródeł impulsowych.

Dla wywołania pożądaných reakcji chemicznych należy wytworzyć plazmę przenikającą całą objętość emitowanych gazów. W reaktorze plazmowym typu GlidArc [18], procesy neutralizacji toksycznych gazów przeprowadza się w „rozrzedzonej” plazmie, powstającej w efekcie specjalnego quasi-łukowego wyładowania, ślizgającego się wzdłuż elektrod reaktora pod wpływem wymuszonego przepływu gazu i sił elektrodynamicznych. Wytworzona w ten sposób nietermiczna plazma wypełnia znaczną część przestrzeni komór wyładowczych a reakcje chemiczne zachodzą w dużych objętościach. Wartość napięcia na elektrodach takiego reaktora plazmowego, potrzebna do zapłonu łuku, wynosi kilkanaście do kilkadziesiąt kV, a do jego podtrzymania około 10 razy mniej i w związku z tym źródło zasilania elektrycznego musi mieć bardzo miękką charakterystykę zewnętrzną $U=f(I)$. Zapewnienie odpowiedniej wydajności procesu wymaga stosowania układów wieloelektrodowych, których łączna moc może sięgać setek kilowatów. Spełnienie takich wymagań powoduje, że układy zasilania elektrycznego reaktorów plazmowych stają się złożone i mało sprawne. Stosuje się najczęściej układy częstotliwości sieciowej z transformatorami o napięciu wtórnym równym napięciu zapłonu i włą-

czanymi szeregowo z każdą parą elektrod dławnikami ograniczającymi prąd i obniżającymi napięcie podczas palenia się łuku. W takim układzie prąd z sieci zasilającej jest kompensowany baterią kondensatorów. Alternatywnym rozwiązaniem dla układu transformatorowego może być układ zasilania, wykorzystujący wyższe harmoniczne strumienia magnetycznego w magnetowodach transformatorów do indukowania napięcia zapłonu. Podstawowa harmoniczna odkształconego strumienia magnetycznego indukuje napięcie, które podtrzymuje ślizgający się wzdłuż elektrod łuk.

Reaktory plazmowe dla zastosowań przemysłowych, niezależnie od rodzaju wykorzystywanych do wytwarzania plazmy wyładowań elektrycznych, łączy wiele cech wspólnych. Są to urządzenia dużych mocy, wymagające zasilania energią elektryczną o wysokim napięciu od kilku do kilkudziesięciu kilowoltów i częstotliwości sieciowej lub podwyższonej [29],[76],[82]. W układach stosowanych do zasilania reaktorów plazmowych zawsze występuje transformator, często specjalnej konstrukcji. Jego rola w układach zasilania reaktorów plazmowych sprowadza się do dopasowania parametrów energii elektrycznej sieci zasilającej do wymagań reaktora.

Rozważania przedstawione w niniejszej pracy dotyczą specjalnego układu transformatorów jednofazowych. Układ taki integruje funkcje zapłonu i podtrzymania wyładowań, dzięki wykorzystaniu wyższych harmonicznych strumienia magnetycznego indukowanego w rdzeniach transformatorów.

Praca składa się z następujących rozdziałów:

1. Wstęp

– w którym przedstawiono uzasadnienie podjęcia tematyki układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym oraz podano tezę, cel i zakres pracy.

2. Reaktory plazmowe jako odbiorniki energii elektrycznej

– w którym podano zasadę budowy i działania oraz przebiegi prądów, napięć i charakterystyki reaktorów plazmy ze ślizgającym się wzdłuż elektrod wyładowaniem łukowym typu Gliding Arc, a także występujące tu zależności energetyczne.

3. Analiza matematyczna układu reaktor plazmowy - układ zasilania

– w którym dokonano przeglądu modeli łuku elektrycznego prądu przemiennego i następnie wybrano model, który po odpowiedniej adaptacji, uwzględniającej specyfikę wyładowań w reaktorze plazmowym GlidArc, wykorzystano do numerycznej symulacji zintegrowanego układu zasilania.

4. Charakterystyka układów zasilania reaktorów plazmowych

– w którym przedstawiono przegląd stosowanych układów zasilania reaktorów plazmowych stosowanych w procesach oczyszczania gazów. Przeprowadzono analizę mocy i sprawności układów zintegrowanych na tle, stosowanych w praktyce, układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

5. Zintegrowany układ zasilania reaktora plazmowego GlidArc

– w którym omówiono zasadę działania układu zintegrowanego, metodę kształtowania jego charakterystyki zewnętrznej, modele fizyczne i

wyniki badań eksperymentalnych. Przedstawiono wybrane aspekty projektowania układów zasilania reaktorów plazmowych. Na wybranym przykładzie wskazano na specyfikę projektowania zintegrowanych układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wzdłuż elektrod wyładowaniem łukowym.

6. Podsumowanie

– w którym przedstawiono wnioski ogólne i szczegółowe wynikające z przeprowadzonych obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych na modelach. Podano tu także najważniejsze, zdaniem autorki, osiągnięcia pracy.

7. Literatura

1. 1. Teza i cel pracy

Przemysłowe procesy plazmowej obróbki gazów wymagają specjalnych układów zasilania, które muszą spełniać szczególne wymagania. Ich realizacja prowadzi do rozbudowy układu zasilania, pociąga za sobą obniżenie jego sprawności i niezawodności oraz podnosi koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Tezą pracy było:

Zjawisko nieliniowości obwodów magnetycznych transformatorów, wykorzystane w układach zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wzdłuż elektrod wyładowaniem łukowym, pozwala budować zasilacze elektromagnetyczne o wymaganej przez reaktor charakterystyce zewnętrznej i prowadzi do integracji podstawowych funkcji układu zasilania oraz istotnej poprawy jego parametrów energetycznych.

Wykazanie prawdziwości powyższej tezy wymagało opracowania modelu matematycznego wyładowania w reaktorze plazmowym, uwzględniającego zjawiska związane z wymuszonym przepływem gazu i geometrią elektrod reaktora, przeprowadzenia obliczeń oraz ich weryfikacji w badaniach eksperymentalnych, na zbudowanych w tym celu modelach fizycznych.

Głównym celem pracy było opracowanie teoretycznych podstaw działania i projektowania zintegrowanych układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym oraz innych reaktorów plazmowych o podobnej charakterystyce prądowo – napięciowej.

Zagadnieniami układów zasilania reaktorów plazmowych autorka zajmuje się od wielu lat. Niektóre wyniki prac zostały opublikowane w pracach [19], [34], [36], [77], [79], [81], [82], [83], oraz opatentowane [30], [32], [75].

Badania nad zintegrowanymi układami zasilania reaktorów plazmowych prowadzone były częściowo w ramach projektu KBN Nr 8 S502 010 05 nt. "Zintegrowany układ zasilania reaktorów ozonu" kierowanego przez autorkę w latach 1993-1994 i kontynuowane są w projekcie badawczym KBN Nr 328/T07/97/13.

2. Reaktory plazmowe jako odbiorniki energii elektrycznej

2.1. Wprowadzenie

W zastosowaniach przemysłowych plazmę wytwarza się w urządzeniach nazywanych zwykle reaktorami plazmowymi. W zależności od zastosowań, metody wytwarzania plazmy, konstrukcji reaktora plazmowego, typu wyładowań elektrycznych wykorzystywanych do wytwarzania plazmy, sposobu wstępnej jonizacji gazu, rodzaju i sposobu zasilania elektrycznego oraz metody regulacji parametrów plazmy można wyróżnić wiele rodzajów reaktorów plazmowych.

Jednym z nowych zastosowań plazmy jest oczyszczanie powietrza z toksycznych zanieczyszczeń stałych i gazowych. Wyładowania elektryczne w reaktorze plazmowym mają na celu dostarczenie dużej liczby wzbudzonych elektronów i zjonizowanych cząsteczek oraz rodników, które będą wywoływać odpowiednie reakcje chemiczne bądź działać jako katalizatory tych reakcji.

Do neutralizacji toksycznych gazów stosuje się plazmę nietermiczną, zwaną też plazmą „zimną”. Plazma „zimna” znajduje się w stanie nierównowagi termodynamicznej, co oznacza że średnie energie wytwa-

rzanych w plazmie elektronów są znacznie wyższe od energii jonów oraz cząsteczek gazu.

W plazmo-chemicznej obróbce gazów znane są i dotychczas wykorzystywane metody generowania nietermicznej plazmy za pomocą cichych wyładowań elektrycznych, wyładowań jarzeniowych, koronowych, impulsowych i mikrofalowych. Plazma wytwarzana jest bezpośrednio w gazie poddawanych obróbce.

Elektryczne wyładowania barierowe są podstawową metodę wytwarzania ozonu w skali przemysłowej [61]. Wykorzystanie wyładowań jarzeniowych jest ograniczone tym, że wyładowanie jarzeniowe przy ciśnieniu atmosferycznym może przejść w wyładowanie łukowe. Energię wyładowań jarzeniowych można z reguły wykorzystać przy niskich ciśnieniach.

W praktyce przemysłowej wymagana jest praca przy ciśnieniu atmosferycznym lub nieznacznie podwyższonym, oraz przy dużych energiach wytwarzanych elektronów, prowadzących do pożądaných reakcji chemicznych. Klasyczny łuk elektryczny, wytwarzany w spawarkach lub palnikach plazmowych (plazmotronach), nie może być wykorzystywany do neutralizacji toksycznych gazów, ponieważ obejmujące ograniczoną przestrzeń wyładowanie łukowe o dużej energii nie może spenetrować, wypełniających znaczną przestrzeń, gazów poddawanych obróbce.

Reaktor plazmowy do generacji plazmy nietermicznej na skalę przemysłową, w którym wykorzystuje się ślizgające się wzdłuż elektrod wyładowanie łukowe w przepływającym gazie przy ciśnieniu atmosferycznym lub podwyższonym, opracowano na początku lat 90-tych

[17],[18]. "Zimna" plazma, w postaci ślizgającego się łuku, jest wytwarzana w dużej objętości tak, aby przy ciśnieniu bliskim atmosferycznemu, przeprowadzić wymagane reakcje chemiczne w zanieczyszczonym gazie o znacznym przepływie.

Główne zastosowania reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem (Gliding Arc) to neutralizacja siarkowodoru, oczyszczanie powietrza z lotnych substancji organicznych (estry, węglowodory, pary alkoholi) powstających w procesach malowania, lakierowania, produkcji tworzyw sztucznych, spalania śmieci i odpadów szpitalnych.

Wielu autorów [8], [16], [20], [21], [57], [58], [67], prowadzących badania nad wykorzystaniem metod plazmowych w technologiach oczyszczania gazów ze szkodliwych dla środowiska zanieczyszczeń, podkreśla ich wysoką efektywność. W przeciwieństwie do metod konwencjonalnych gazy odlotowe nie muszą być, przed oczyszczaniem plazmowym, poddawane dodatkowej, zwykle kosztownej, obróbce wstępnej. W przypadku usuwania zanieczyszczeń powietrza substancjami organicznymi konwencjonalne techniki mają liczne ograniczenia; metody katalityczne wymagają wstępnego oczyszczania gazów roboczych, metody chemiczne wymagają wysokich temperatur, a metody biologiczne są mało elastyczne przy zmianie stopnia oraz rodzaju zanieczyszczenia i są opłacalne tylko przy dużych przepływach gazu roboczego [21].

2. 2. Przegląd wybranych konstrukcji reaktorów plazmowych stosowanych w technologiach oczyszczania toksycznych gazów

Wszystkie typy urządzeń, wykorzystujących wyładowania elektryczne do wytwarzania plazmy, działają na tej samej zasadzie – energia elektryczna wyładowania jest wykorzystywana do wytworzenia wysokoenergetycznych elektronów. Przy ciśnieniu atmosferycznym elektrony rzadko kolidują z cząsteczkami zanieczyszczeń, natomiast zderzając się z cząsteczkami gazu podstawowego (zawierającego zanieczyszczenia) wytwarzają rodniki o znacznie dłuższym przeciętnym czasie życia. Rodniki te reagują ze skażonymi cząsteczkami gazu podstawowego.

W tablicy 2.1 podano klasyfikację reaktorów plazmowych, pracujących przy ciśnieniu atmosferycznym i podwyższonym, stosowanych w technologiach ochrony środowiska związanych z oczyszczaniem powietrza z toksycznych zanieczyszczeń gazowych. Klasyfikacja dotyczy jedynie reaktorów plazmowych, w których do wytwarzania plazmy wykorzystuje się różne rodzaje wyładowań elektrycznych. Kryteria, którymi kierowano się w poniższej klasyfikacji to: typ wyładowań wytwarzających plazmę, budowa elementów wyładowczych i rodzaj zasilania elektrycznego.

Pierwszą grupę stanowią reaktory plazmowe z wyładowaniami barierowymi. Wyładowania barierowe są wyładowaniami cichymi (niezupełnymi), zachodzącymi w układzie dielektrycznym uwarstwionym. Wśród reaktorów plazmowych z wyładowaniami cichymi rozróżnia się:

- reaktory pracujące przy częstotliwości sieciowej lub podwyższonej,
- reaktory zasilane energią impulsową,

– reaktory z wyładowaniem jarzeniowym pracujące przy ciśnieniu atmosferycznym, wykorzystujące elektrodę siatkową [58].

Tablica 2.1. Klasyfikacja reaktorów plazmowych

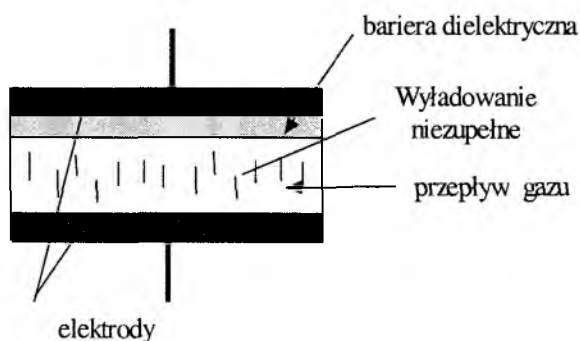
Reaktor plazmowy	Wykorzystywane wyładowanie elektryczne	Rodzaj zasilania elektrycznego
1. Reaktory z wyładowaniami niezupełnymi – ozonatory	Barierowe w uwarstwionym układzie dielektrycznym	Napięcie sinusoidalne (AC) częstotliwości sieciowej i podwyższonej
2. Reaktory w wypełnieniu ferroelektrycznym (ferroelectric bed-packed)	Wyładowania niezupełne, koronowe, ślizgowe	- Napięcie sinusoidalne (AC) podwyższonej i wysokiej częstotliwości - Napięcie impulsowe - Napięcie stałe (DC)
3. Reaktory o silnie niejednorodnym polu elektrycznym – koronatory	Wyładowania koronowe	- Napięcie stałe - Napięcie sinusoidalne - Napięcie impulsowe
4. Reaktory z wyładowaniami powierzchniowymi	Wyładowania powierzchniowe	Napięcie sinusoidalne podwyższonej częstotliwości
5. Reaktory z łukiem elektrycznym – plazmotrony	Wyładowania łukowe stabilizowane przepływem gazu	Napięcie sinusoidalne częstotliwości sieciowej
6. Reaktory z wyładowaniem łukowym ślizgającym się wzdłuż elektrod	Wyładowanie quasi-łukowe	- Napięcie sinusoidalne częstotliwości sieciowej - Napięcie stałe

Na rysunku 2.1 przedstawiono schematycznie konstrukcję reaktora plazmowego z wyładowaniami barierowymi. Reaktory plazmowe z wyładowaniami barierowymi są najbardziej dojrzałe technologicznie, a przemysłowe instalacje tych reaktorów, o mocach przekraczających setki kilowatów, stosowane są głównie w technologiach uzdatniania wody pitnej, w przemyśle papierniczym, farmaceutycznym i chemicznym. Prowadzone są także badania nad zastosowaniem omawianych reaktorów do neutralizacji toksycznych gazów. Zaletą wyładowania barierowego jest praca przy ciśnieniu atmosferycznym, niska temperatura gazu roboczego (300-400 K) [67], niezależność pa-

rametrów wyładowania od składu gazu poddawanego obróbce, prosta technologia otrzymywania wyładowania. Główną wadą reaktora plazmowego z wyładowaniami barierowymi jest mała odległość międzyelektrodowa (nie przekraczająca 5 mm) i związana z tym ograniczona przestrzeń robocza reaktora.

Wśród reaktorów z silnie niejednorodnym polem elektrycznym można wyróżnić:

- reaktory typu „ferroelectric packed-bed”, z dielektrykiem w postaci warstwy dielektrycznych „kulek” o wysokiej stałej dielektrycznej umieszczonych między elektrodami siatkowymi [66],
- reaktory z wyładowaniem koronowym typu ostrze-płyta, drut-płyta lub drut-cylinder, zasilane napięciem stałym, przemiennym lub impulsowym.



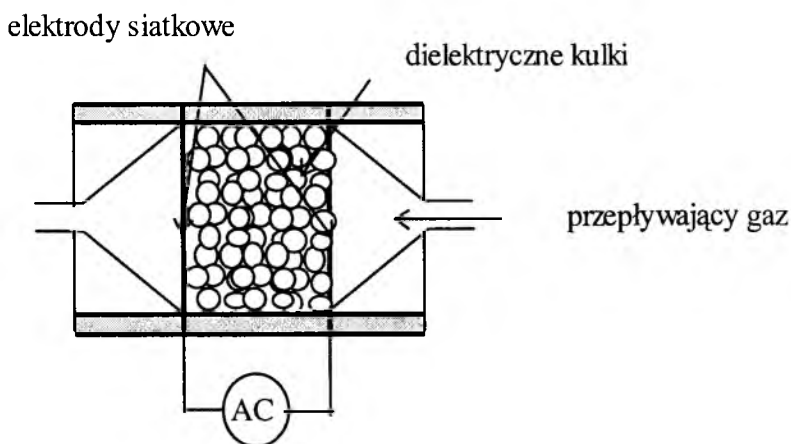
Rys. 2.1. Schemat reaktora plazmowego z wyładowaniami barierowymi w uwarstwowionym układzie dielektrycznym

Do grupy reaktorów z niejednorodnym polem elektrycznym należy też zaliczyć reaktory plazmowe z wyładowaniami powierzchniowymi,

które najczęściej zasilane są napięciem przemiennym wysokiej częstotliwości.

Wszystkie reaktory plazmowe tej grupy są źródłem plazmy nierównowagowej. Temperatura gazu roboczego nie przekracza 500 K [74], a dzięki silnie niejednorodnemu polu elektrycznemu, wytwarzane elektrony są przyspieszane i uzyskują znaczne energie.

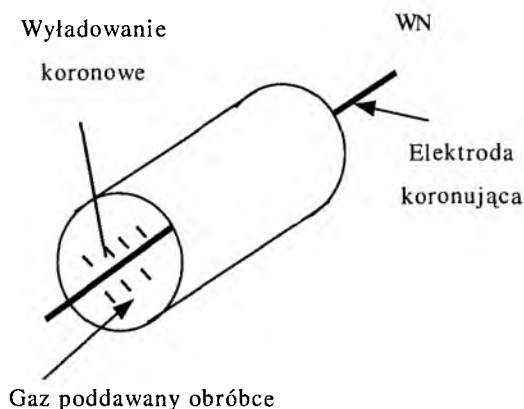
Ideę budowy reaktora plazmowego typu „ferroelectric bed-packed” przedstawia rysunek 2.2.



Rys. 2.2. Schemat reaktora „ferroelectric bed-packed”

W reaktorach z rys. 2.2. barierę dielektryczną stanowią kulki o wysokiej stałej dielektrycznej, umieszczone między elektrodami siatkowymi. W miejscach styku kulek dielektrycznych powstaje intensywne, silnie niejednorodne pole elektryczne, inicjujące wyładowania elektryczne w postaci krótkich impulsów. Natężenie impulsów można regulować wartością i częstotliwością napięcia zasilającego reaktor oraz dobierając odpowiedni dielektryk o wysokiej stałej dielektrycznej. Prowadzone są także liczne badania

nad zastosowaniem reaktorów koronowych [58],[61],[63], [74] typu ostrze-płyta, drut-płyta czy drut-cylinder. Na rys. 2.3 przedstawiono schematycznie ideę budowy reaktora z wyładowaniem koronowym.

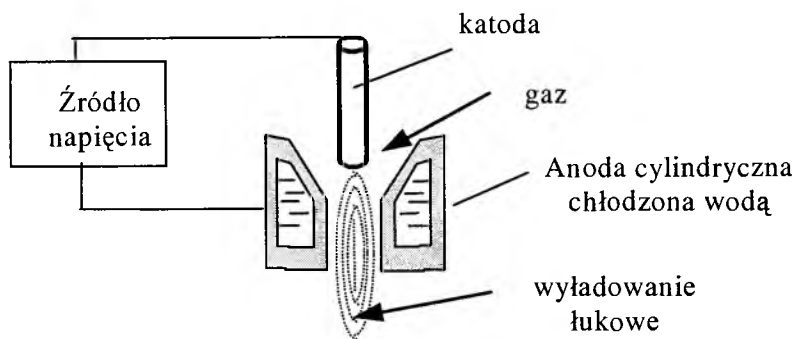


Rys. 2.3. Schemat reaktora z wyładowaniem koronowym typu drut- cylinder

Do plazmo-chemicznej obróbki gazów stosuje się także reaktory wytwarzające plazmę równowagową, tj. będącą w stanie równowagi termodynamicznej. W takiej plazmie średnie energie elektronów, jonów i cząsteczek są sobie równe. Plazma będąca w równowadze termodynamicznej wytwarzana jest w reaktorach z wyładowaniami w postaci łuku elektrycznego i w palnikach plazmowych. Wymienić tu można klasyczne palniki plazmowe z wyładowaniem łukowym, stabilizowanym przepływem gazu, zwane plazmotronami, pracujące przy zasilaniu napięciem stałym i przemiennym. Plazmotrony z wyładowaniem łukowym stosowane są od wielu lat w metalurgii, obróbce powierzchniowej, topieniu metali. Ostatnio stosuje się je także w nowoczesnych technologiach oczyszczania gazów.

Idea pracy plazmotronu jest stosunkowo prosta. W obszar wyładowania wtłaczany jest gaz poddawany obróbce, powstałe wyładowanie łukowe pali

się w sposób stabilny między elektrodami reaktora, nie przegrzewając gazu w całej objętości. Reaktory plazmowe z wyładowaniem łukowym mogą pracować przy zasilaniu napięciem stałym i przemiennym. Schemat reaktora przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2. 4. Schemat klasycznego plazmotronu z łukiem elektrycznym stabilizowanym szybko przepływającym gazem

Ostatnią grupą przedstawionych w tabelicy 2.1 reaktorów plazmowych stanowią reaktory z wyładowaniem łukowym ślizgającym się wzdłuż elektrod. Idea reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem quasi-łukowym, stabilizowanym szybko przepływającym gazem, powstała na uniwersytecie w Orleanie, a jego twórcy nadali reaktorowi nazwę „GlidArc” [17],[18]. W 1990 r. reaktor został zaprezentowany na światowej wystawie EXPO’90 oraz opatentowany we Francji. Badania laboratoryjne oraz próby przemysłowe potwierdziły skuteczność reaktora w technologiach utylizacji toksycznych zanieczyszczeń stałych i gazowych emitowanych w różnych procesach przemysłowych, zwłaszcza w

procesach malowania i lakierowania oraz w procesach spalania [19],[52],[90].

Plazma wytwarzana w wyładowaniach elektrycznych znajduje się zazwyczaj w stanie nierównowagi termodynamicznej, tzn. średnia energia elektronów, która wynosi od kilku do kilkunastu elektronowoltów, jest większa od średniej energii pozostałych składników plazmy. Taka plazma nazywana jest też nietermiczną.

Wyładowanie łukowe przy ciśnieniu atmosferycznym jest źródłem plazmy, której część znajduje się w stanie lokalnej równowagi termodynamicznej, a część, podobnie jak wyładowania niezupełne, w stanie nierównowagi termodynamicznej [58].

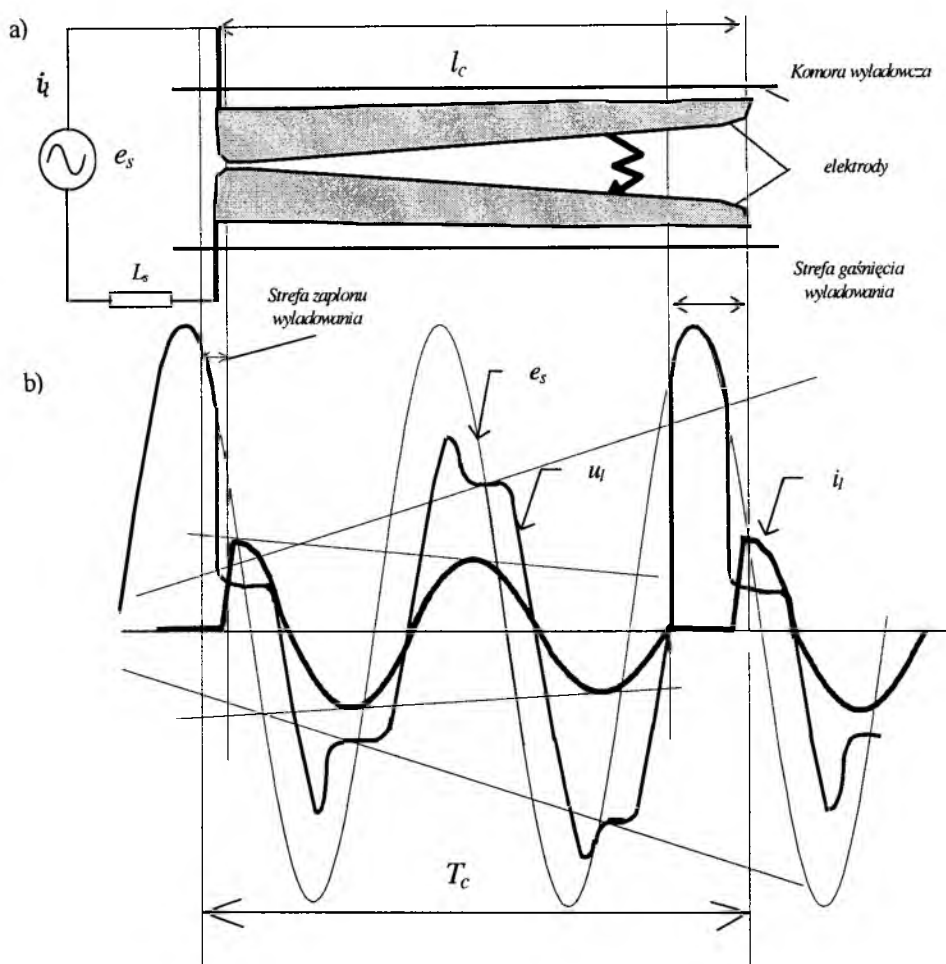
Specyficznym wyładowaniem jest ślizgający się łuk w reaktorze plazmowym GlidArc. Przeważająca część energii (80-90 %) [24] ślizgającego się wyładowania łukowego jest wyzwolana w fazie nierównowagowej. Ponieważ działanie takiego reaktora jako odbiornika energii elektrycznej nie zostało dotychczas dostatecznie przeanalizowane, w następnych rozdziałach przedstawiono podstawowe przebiegi, charakterystyki oraz zależności energetyczne reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

2.3. Zasada budowy i działania reaktora plazmowego GlidArc

W reaktorze plazmowym tego typu dwie lub więcej par elektrod, często płaskich i odpowiednio wyprofilowanych, jak zaznaczono to schematycznie na rys. 2.5a, umieszczone są w komorze wyładowczej, przez którą przepływa z dużą prędkością (10-20 m/s) gaz poddawany obróbce plazmo-chemicznej. Wyładowania elektryczne powstają w miejscu,

w którym odległość między elektrodami jest najmniejsza. Kolumna łukowa w miejscu zapłonu wyładowania znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej. Z powodu szybkiego przepływu gazu roboczego następuje przesuwanie się kolumny łukowej wzdłuż rozszerzających się elektrod. Wyładowanie ślizga się wzdłuż ostrzy elektrod, aż do miejsca, w którym następuje jego zerwanie. Towarzyszy temu wzrost długości i objętości kolumny wyładowania. W wyniku kilkukrotnego wzrostu długości kolumny łukowej, w stosunku do długości łuku w strefie zapłonu (równowagi termodynamicznej), doprowadzona energia elektryczna nie jest w stanie zrównoważyć strat ciepła, wskutek czego następuje obniżenie temperatury ośrodka gazowego wewnątrz kolumny. Powstaje następna faza wyładowania, zwana fazą nierównowagową. Zerwanie wyładowania łukowego następuje w momencie, gdy energia dostarczana ze źródła zasilania nie jest w stanie dłużej kompensować strat energetycznych wydłużającej się kolumny łukowej. Po zgaśnięciu łuku w strefie gaśnięcia, wyładowanie odbudowuje się natychmiast w strefie zapłonu i rozpoczyna się następny cykl pracy reaktora. Na rysunku 2.5 przedstawiono teoretyczne przebiegi napięć i prądu w czasie jednego cyklu wyładowania.

Czas trwania jednego cyklu T_c zależy od wymiarów i kształtu elektrod, prędkości przepływu, temperatury i rodzaju gazu i może wynosić od kilku do kilkunastu okresów napięcia zasilającego przy $f=50$ Hz. W miejscu zapłonu wyładowanie ma charakter łuku, ale przemieszczając się wzdłuż elektrod, pod wpływem szybko przepływającego gazu, przybiera charakter wyładowania bardziej zbliżonego do jarzeniowego.



Rys. 2.5. Budowa i chwilowe przebiegi prądów i napięć reaktora plazmowego GlidArc, a – budowa, b – przebiegi chwilowe napięć i prądu w czasie pracy reaktora wyładowczego przy zasilaniu z sinusoidalnego źródła napięcia; (l_c – długość elektrod, T_c – czas trwania jednego cyklu wyładowania, i_l – prąd wyładowania, e_s – siła elektromotoryczna źródła, L_s – indukcyjność wewnętrzna źródła)

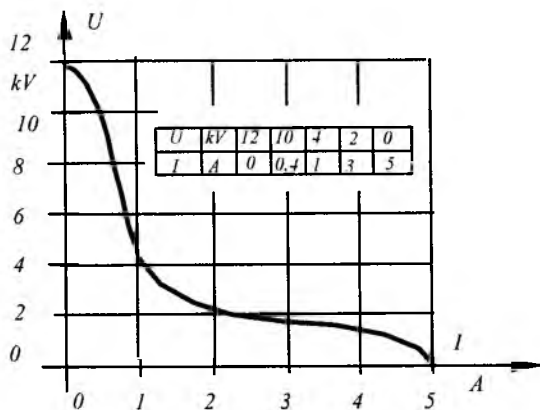
Wyładowania takie jest nietermiczne i pozwala skutecznie eliminować wiele toksycznych zanieczyszczeń gazowych.

2. 4. Przebiegi prądów i napięć, charakterystyki

Dostarczanie energii elektrycznej, niezbędnej do pracy reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, wymaga specjalnych układów zasilających. Reaktory plazmowe jako odbiorniki energii elektrycznej różnią się znacznie od innych odbiorników energii i ich współpraca z układem zasilającym wymaga odmiennej analizy. Aby określić wymagania jakie winny spełniać układy zasilające, scharakteryzujemy reaktor plazmowy typu GlidArc jako odbiornik energii elektrycznej. Rezystancja przestrzeni międzyelektrodowej zależy od stopnia jonizacji gazu i podczas jednego cyklu pracy zmienia swoją wartość.

Natężenie prądu pary elektrod nie powinno przekraczać 10 A, a napięcie zapłonu przy minimalnym odstępie elektrod (2-3 mm) musi osiągnąć wartość rzędu 10 kV [77]. Natomiast podczas wyładowania napięcie między elektrodami wynosi (1-2) kV. Napięcie łuku stanowi więc zaledwie (10-20) % napięcia zapłonu. Charakterystyka zewnętrzna reaktora plazmowego jest zatem bardzo podatna (Rys.2.6) i przy jednoczesnej realizacji zapłonu i pracy z jednego źródła wykorzystanie jego mocy będzie niewielkie, co jest podstawową wadą klasycznych układów zasilania. Przebiegi chwilowych wartości napięcia, prądu i mocy w dwuelektrodowym reaktorze plazmowym podano na rys. 2.7. Prąd łuku i_l jest praktycznie sinusoidalny, natomiast napięcie łuku u_l jest bardzo odkształcone. Analiza harmoniczna oscylogramów wykazała [79], że pierwsza harmoniczna napięcia jest w fazie z prądem, co oznacza, że w łuku, przy sinusoidalnym prądzie (rys. 2.7b) nie ma mocy biernej przesunięcia fazowego. W łuku

występuje więc moc czynna P_l i moc bierna odkształcenia D_l . Moc czynną łuku określa prąd i pierwsza harmoniczna napięcia.



Rys. 2.6. Wyznaczona doświadczalnie charakterystyka zewnętrzna reaktora plazmowego [78].

Moc chwilową łuku, przy jednej parze elektrod, określa zależność:

$$p_l = U_{1m} \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

gdzie: U_{1m} – wartość maksymalna I harmonicznej odkształconego napięcia wyładowania łukowego,

I_m – wartość maksymalna sinusoidalnego prądu wyładowania.

Dla reaktora plazmowego trójelektrodowego, zasilanego z transformatora trójfazowego, moc czynna, przy symetrii w trzech fazach, wyniesie:

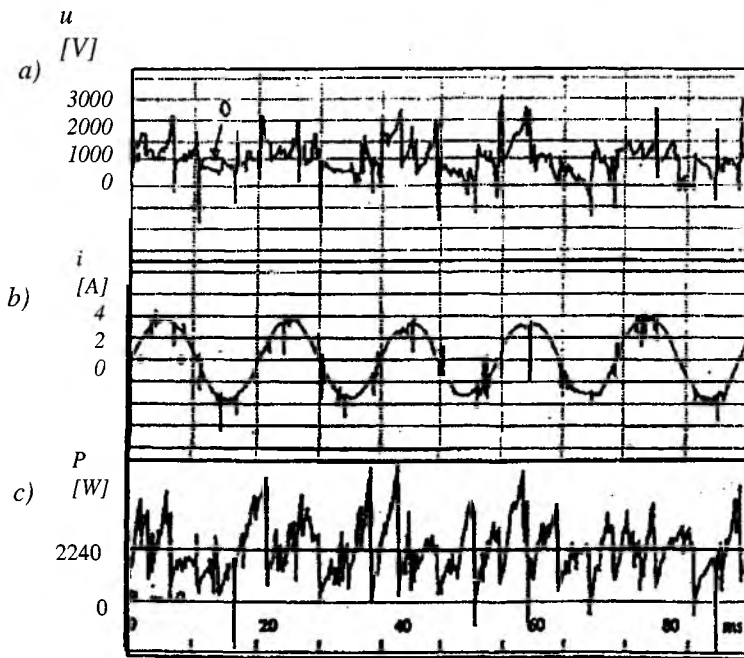
$$P_l = \frac{3}{T} \int_0^T p_l dt = \sqrt{3} U_1 I \quad (2.2)$$

Moc bierna odkształcenia D_l możemy określić jako:

$$D_l = \sqrt{3}I\sqrt{U^2 - U_1^2} \quad (2.3)$$

przy czym: U , I – odpowiednio, skuteczne wartości odkształconego napięcia łuku i natężenia prądu łuku,
 U_1 – skuteczna wartość pierwszej harmonicznej napięcia wyładowania łukowego.

Układ zasilania pobiera moc bierną Q , na magnesowanie magneto-
 wodów transformatora i innych elementów układu, oraz na indukcyjność
 rozproszenia. Moc bierna odkształcenia D_l jest zdeterminowana zjawis-
 kami w palącym się łuku i w zasadzie nie mamy wpływu na jej ograni-
 czenie.



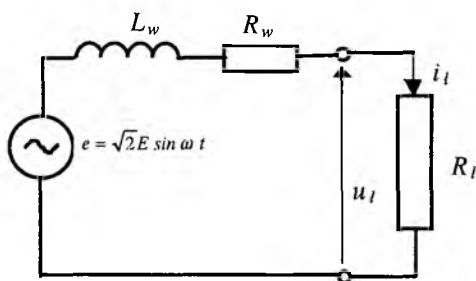
Rys. 2.7. Oscylogramy przebiegów wartości chwilowych napięcia, prądu i mocy łuku w reaktorze dwuelektrodowym GlidArc zasilanym z transformatora: a) napięcie łuku, b) prąd łuku, c) moc chwilowa łuku [18].

Natomiast moc bierna przesunięcia Q , związana ze strukturą układu, może być w istotny sposób zminimalizowana przez odpowiednią modyfikację układu zasilającego, co jest jednym z głównych celów pracy.

2. 5. Zależności energetyczne w reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

Uproszczone rozważania energetyczne przeprowadzimy przyjmując jednofazowy schemat zastępczy dla układu: rzeczywiste, sinusoidalne źródło zasilania - para elektrod reaktora plazmowego. Przed zapłonem prąd nie płynie, napięcie na elektrodach jest równe napięciu źródła, a rezystancję przestrzeni międzyelektrodowej można przyjąć za nieskończoność. Dla analizy mocy istotny jest stan po zapłonie który nastąpi, gdy wartość chwilowa napięcia źródła przekroczy napięcie zapłonu. Indukcyjność rozproszenia (zwarcia) transformatora L_w jest stała, natomiast rezystancja łuku R_l zmienia swoją wartość w czasie każdego półokresu zmian napięcia, a prąd i napięcie wyładowania łukowego mają przebieg odbiegający od sinusoidy. Indukcyjność rozproszenia L_w ma zwykle znaczną wartość, aby ograniczyć prąd zwarcia, co powoduje że odkształcenie prądu jest znacznie mniejsze niż odkształcenie napięcia (rys. 2.7). Jeżeli do przybliżonych rozważań przyjmiemy, że prąd ma kształt sinusoidalny i nieliniową rezystancję łuku zastąpimy wartością stałą R_l to schemat zastępczy reaktora plazmowego przyjmie postać przedstawioną na rys. 2.8.

Jeżeli prąd łuku jest ograniczany dławikami to indukcyjność L_w , na schemacie zastępczym, jest sumą reaktancji transformatora i dławika. Rezystancja statyczna łuku R_l , występująca podczas wyładowania w przepływającym gazie, ma wartość kilkuset omów [78] i jest miarą mocy czynnej łuku. Przerwy bezprądowe, występujące między kolejnymi cyklami są niewielkie, trwają nie dłużej niż 1/4 okresu napięcia źródła ($\sim 1,66$ ms) i ich wpływ na wartość mocy czynnej reaktora może być w tych rozważaniach pominięty.



Rys. 2.8. Schemat zastępczy reaktora plazmowego do rozważań energetycznych, R_l - rezystancja statyczna łuku, R_w , L_w - rezystancja i indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania, e - napięcie źródła zasilania

Przy powyższych założeniach wartość rezystancji statycznej łuku można określić jako stosunek wartości skutecznych pierwszych harmoniczných napięcia i prądu łuku, czyli:

$$R'_l = \frac{U_{1ht}}{I_{1ht}} \quad (2.4)$$

Ponieważ prąd reaktora jest w tym przypadku sinusoidalny rezystancję statyczną można też wyznaczyć z mocy czynnej łuku P_l i prądu łuku I_l :

$$R_l'' = \frac{P_l}{I_l^2}. \quad (2.5)$$

Przy sinusoidalnym prądzie wartości statycznej rezystancji łuku R_l wyznaczone z zależności (2.4) bądź (2.5) nie różnią się. W przypadku, gdy źródło zasilania ma małą indukcyjność wewnętrzną L_w , odkształcenie prądu musi być uwzględnione i zastępcza rezystancja łuku musi być wyznaczana z zależności (2.5).

Jak wykazała analiza przedstawiona w [19], w układach zasilania reaktora plazmowego typu GlidArc, bez układu zapłonowego, moc bierna przesunięcia Q jest około 10 razy większa od mocy czynnej łuku P_l . Moc bierna odkształcenia D_l natomiast nie przekracza 30 % mocy czynnej łuku, a więc stanowi około 3% mocy biernej przesunięcia Q . W takim przypadku, analizując wpływ stosunku reaktancji źródła do rezystancji zastępczej łuku na sprawność i wykorzystanie mocy układu zasilającego, można pominąć moc odkształcenia łuku. Przy pominięciu mocy odkształcenia moc czynną wyładowania w reaktorze plazmowym jest równa w przybliżeniu mocy pozornej wyładowania i możemy ją wyznaczyć jako:

$$P_l = S_l \approx U_{ll} I_{ll} \approx U_l I_l, \quad (2.6)$$

oraz posłużyć się reaktancją wewnętrzną źródła X_w .

Przedstawiony na rysunku 2.8 obwód zasilania opisuje równanie:

$$\sqrt{2}E \sin \omega t = (R_w + R_l) \cdot i_l + L_w \frac{di_l}{dt}, \quad (2.7)$$

którego rozwiązaniem jest sinusoidalny prąd. Wprowadzając oznaczenia,

$$\begin{aligned} \lambda_w &= \frac{R_w}{\sqrt{R_w^2 + X_w^2}}, \quad x = \frac{R_l}{\sqrt{R_w^2 + X_w^2}}, \\ x_w &= \frac{X_w}{\sqrt{(R_w + R_l)^2 + X_w^2}}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

można wyrazić moc czynną łuku P_l oraz moc czynną źródła zasilającego $P_{\text{źr}}$ poprzez tak zdefiniowane parametry następująco:

$$P_l = \frac{E^2}{\sqrt{R_w^2 + X_w^2}} \cdot \frac{x}{1 + 2 \cdot \lambda_w \cdot x + x^2}, \quad (2.9)$$

$$P_{\text{źr}} = \frac{E^2}{\sqrt{R_w^2 + X_w^2}} \cdot \frac{x + \lambda_w}{1 + 2 \cdot \lambda_w \cdot x + x^2}.$$

Korzystając z zależności (2.9) można przeprowadzić analizę wpływu reaktancji wewnętrznej źródła zasilania na moc i sprawność analizowanego układu.

Maksymalna moc czynna będzie wydzielana w rezystancji modelującej łuk w warunkach dopasowania, co przy wymuszeniu harmonicznym wymaga spełnienia warunku:

$$\underline{Z}_o = \underline{Z}_w^*, \quad (2.10)$$

gdzie: $\underline{Z}_o = R + jX$ jest impedancją odbiornika, którą założyliśmy w naszym przypadku równą rezystancji statycznej łuku $Z_o = R_l$,
 $Z_w^* = R_w + jX_w$ wartość zespolona sprzężona impedancji wewnętrznej źródła zasilania

Z warunku określonego zależnością (2.10) wynika, że:

$$\text{Im}(Z + Z_w) = 0, \quad (2.11)$$

co w układzie z rys. 2.8 nigdy nie będzie spełnione i co oznacza, że przypadek dopasowania ze względu na moc czynną w przypadku obwodu z łukiem nie występuje. Badając w analizowanym obwodzie przypadek dopasowania odbiornika do źródła, przy stałej wartości współczynnika mocy, i biorąc pod uwagę, że dopasowanie to zachodzi przy równości modułów impedancji odbiornika i impedancji wewnętrznej źródła,

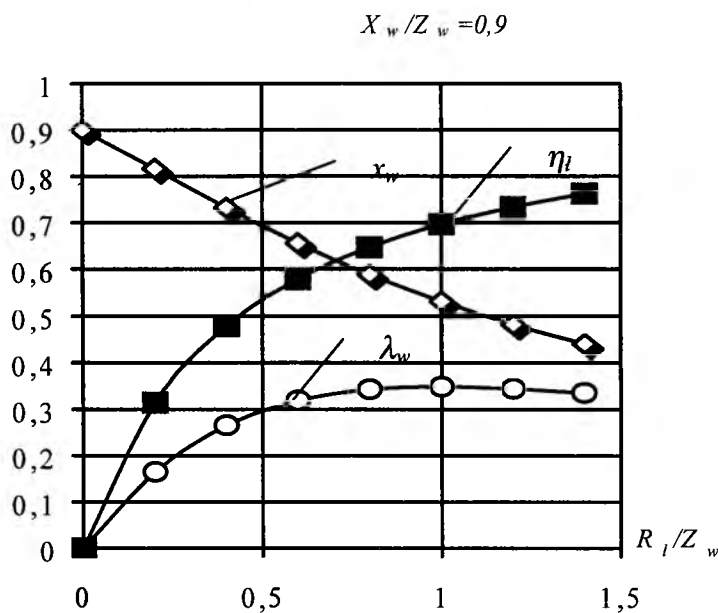
$$R_l = Z_w, \quad (2.12)$$

uzyskuje się zależność na wartość maksymalną mocy pozornej łuku S_l , która jest równa, przy powyższych założeniach, mocy czynnej wydzielanej w rezystancji R_l modelującej wyładowanie łukowe. Zależność tę, wyrażoną przez moduł Z_w i fazę ($\varphi_w = \arccos \lambda_w$) impedancji wewnętrznej źródła zasilającego przedstawia równanie 2.13,

$$P_{l_{\max}} = S_{l_{\max}} = \frac{E^2}{2Z_w} \cdot \frac{1}{1 + \lambda_w}. \quad (2.13)$$

Na rysunkach 2.9 – 2.12 przedstawiono wyniki rozważań wpływu reak-tancji wewnętrznej źródła zasilającego w obwodzie z rys. 2.8 na jego moc i sprawność przy obciążeniu rezystancją statyczną łuku.

Na rys.2.9 przedstawiono zależności współczynników λ_w i x_w oraz sprawności η_l (określonej stosunkiem mocy łuku do mocy źródła) od stosun-ku rezystancji statycznej łuku R_l do impedancji wewnętrznej źródła zasilania Z_w . Pierwszy współczynnik λ_w jest miarą współczynnika mocy układu i osią-ga wartość maksymalną dla $R_l=Z_w$.

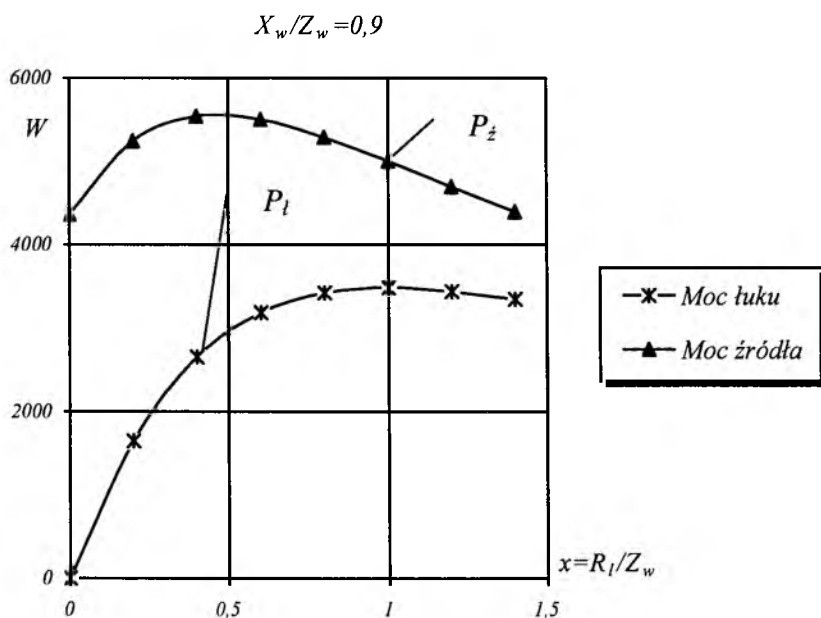


Rys.2.9. Zależność współczynników λ_w , η_l i x_w od stosunku $x=R_l/Z_w$

W tych warunkach sprawność wyładowania łukowego, wyrażająca się stosunkiem mocy czynnej łuku P_l do mocy czynnej źródła P_{zr} , wynosi $\eta_l= 70\%$, a wartość reaktancji wewnętrznej X_w układu zasilania, w od-niesieniu do wypadkowej impedancji obwodu Z , wynosi 53%. Jak wynika

z rys. 2.9, wraz ze zmniejszaniem się stosunku reaktancji źródła do wypadkowej impedancji obwodu X_w/Z , rośnie sprawność obwodu, przy jednoczesnym nieznacznym zmniejszaniu się współczynnika mocy, który w tym przypadku jest zawsze niski i nie przekracza 0,35, a w najbardziej korzystnym przypadku osiągnie wartość 0,5.

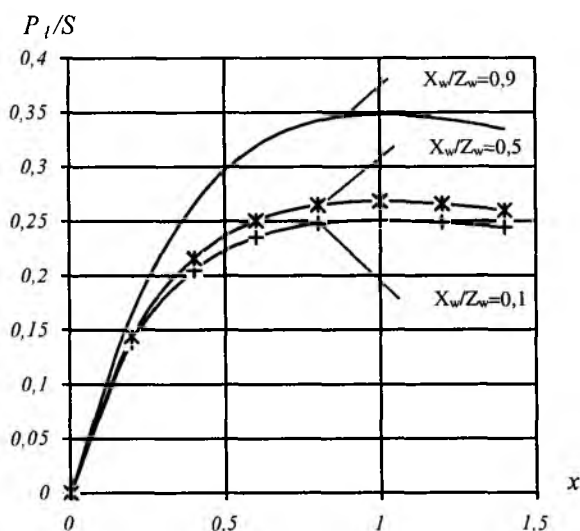
Ten niski współczynnik mocy wynika z faktu, że rozważany jest przypadek układu bez dodatkowego zapłonu. Napięcie źródła w stanie jałowym U_o musi być zatem równe napięciu zapłonu wyładowań U_z . Źródło ma, w tym przypadku, dużą reaktancję wewnętrzną, aby zdławić różnicę między napięciem zapłonu a napięciem płonącego łuku, która może stanowić $(0,8-0,9)U_o$.



Rys. 2.10 Moc źródła i moc łuku w funkcji stosunku statycznej rezystancji łuku do impedancji wewnętrznej układu zasilania R_l/Z_w

Zmiany mocy czynnej łuku i mocy czynnej źródła, w funkcji względnej rezystancji łuku x , przedstawiono na rysunku 2.10.

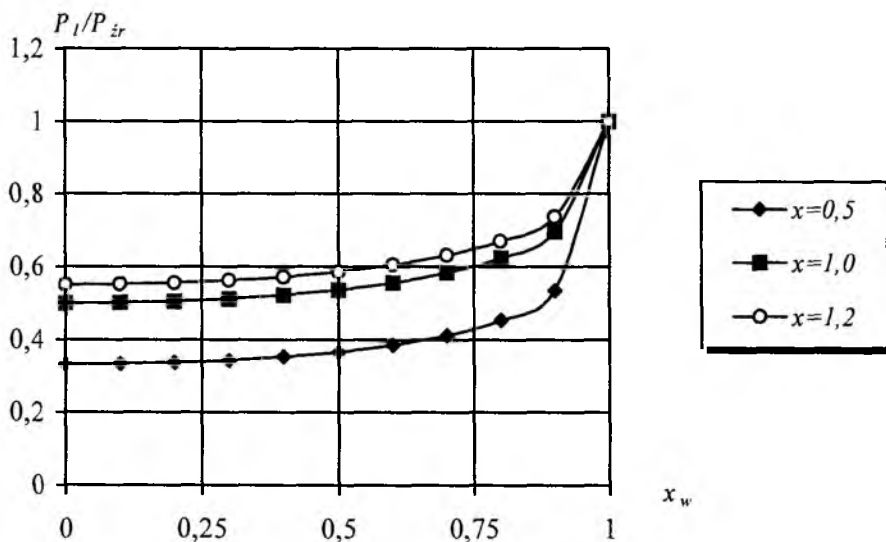
Na rys. 2.12 przedstawiono zależność sprawności łuku η_l , wyrażonej stosunkiem mocy czynnej łuku P_l do mocy wytwarzanej w źródle zasilającym $P_{\text{źr}}$. Sprawność łuku rośnie wraz ze wzrostem x_w , osiągając maksimum dla $x_w=1$ i jest tym większa im większy jest stosunek rezystancji statycznej łuku do impedancji wewnętrznej obwodu zasilania.



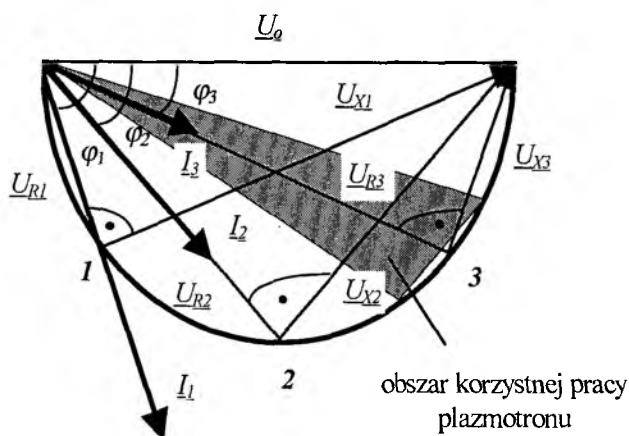
Rys. 2.11. Zależność współczynnika mocy obwodu λ_w od x , dla różnych X_w/Z_w

Rozważania dotyczące wpływu reakcji wewnętrznej źródła zasilania na wykorzystanie jego mocy przeprowadzono także na podstawie wykresu wektorowego pierwszych harmonicznych prądu i napięcia, a wyniki tych rozważań zilustrowano wykresami przedstawionymi na rysunkach 2.13 i 2.14. Przy założeniu stałej wartości statycznej rezystancji łuku podczas wyładowań łukowych w reaktorze możemy, zależności energie-

tyczne dla pierwszych harmonicznych prądu i napięcia, przedstawić także na wykresie wektorowym (Rys. 2.13).



Rys. 2.12 Stosunek mocy łuku do mocy źródła w funkcji x_w dla wybranych wartości x



Rys. 2.13. Wykres wektorowy napięć i prądów reaktora plazmowego typu Gli-dArc dla trzech różnych wartości reaktancji źródła

Napięcie U_o , na zaciskach reaktora plazmowego w stanie jałowym, jest równoważone przez napięcie na przerwie międzyelektrodowej a po zapłonie, przez napięcie na reaktancji wewnętrznej źródła U_X i napięcie łuku U_R . Wykres wielkości z indeksem 1 opisuje reaktor plazmowy bez układu zapłonowego, kiedy napięcie źródła w stanie jałowym musi być równe napięciu zapłonu i źródło ma tak dużą reaktancję wewnętrzną, aby napięcie na palącym się łuku wynosiło 10-20% napięcia zapłonu, to jest $(0,1-0,2)U_o$. Wykorzystanie mocy uzwojenia wtórnego transformatora, zasilającego reaktor, wyniesie około 15%, a mocy całego transformatora około 20%. Współczynnik mocy λ_b , który można tu uznać za współczynnik wykorzystania mocy źródła wyniesie około 0,15, a sprawność energetyczna układu zasilania będzie bardzo niska. Wykres wielkości z indeksem 2 opisuje reaktor plazmowy, w którym średnia wartość rezystancji łuku R_l jest równa reaktancji źródła zasilania ($R_l = X_w$). Przy założeniu stałej X_w i regulowanej R_l (np. przez zmianę odstępów elektrod) oraz przy możliwym do realizacji zapłonie (dla stałego U_o) moc oddawana przez źródło byłaby największa. Przypadek ten w praktyce jest raczej nie realizowany, bowiem duży spadek napięcia na reaktancji wewnętrznej zmniejsza wykorzystanie mocy źródła i sprawność układu. Pożądany punkt pracy reaktora plazmowego przedstawia wykres wielkości z indeksem 3 i obszar zakresowany wokół wymienionego przypadku.

Reaktancja źródła, wynosząca około 30% przy dobrym układzie zapłonowym, zapewni dostateczną stabilność pracy reaktora plazmowego, wykorzystanie mocy źródła do około 95% i zadowalająco wysoką sprawność. Moc źródła zasilania jest ograniczona napięciem w stanie jałowym

U_o i dopuszczalnym prądem I_o , którego wartość przy danym napięciu jest ograniczona reaktancją wewnętrzną źródła X_w . Parametry reaktora plazmowego i układu zasilania winny być tak dobrane, aby praca odbywała się z maksymalną mocą i sprawnością i aby była stabilna. Moc łuku P_l nie może być większa od mocy odniesienia, określonej iloczynem napięcia w stanie jałowym U_o i dopuszczalnego prądu I_o :

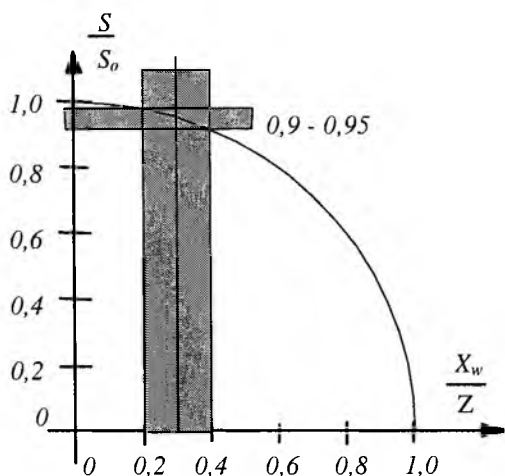
$$S_o = U_o \cdot I_o = S_{\max} \quad (2.14)$$

gdzie: $I_o = \frac{U_o}{X_w}$,

Dobierając odpowiednio reaktancje źródła zasilania X_w można dowolnie przybliżyć moc czynną łuku do mocy maksymalnej, jednak dla zapewnienia odpowiedniej stabilności pracy reaktora plazmowego reaktancja ta nie powinna być mniejsza niż 30% (rys.2.14).

Dokładna analiza mocy wymagałaby uwzględnienia odkształcenia napięcia łuku, a przy małej indukcyjności L_w obwodu zasilającego, również i odkształcenia prądu wywołanego nieliniową rezystancją łuku R_f . Analizie mocy przy przebiegach odkształconych [15], oraz analizie mocy reaktorów plazmowych zasilanych ze źródeł o napięciu sinusoidalnym [39],[46] poświęcono liczne prace. Moc bierna odkształcenia w łuku jest w analizowanych reaktorach plazmowych znacznie mniejsza od mocy biernej przesunięcia, występującej w układzie zasilania i jej wpływ na straty mocy, wymiary układu, moc pobieraną z sieci, jest pomijalny. Wyniki przedstawione na rysunkach 2.9 - 2.14 dotyczą stałej rezystancji łuku

R_l i uzyskano je przy założeniu, że reaktancja wewnętrzna źródła zasilania X_w nie wpływa na wartość tej rezystancji.



Rys. 2.14 Wpływ reaktancji źródła zasilania na wykorzystanie jego mocy, przy
 czym $Z = \sqrt{R_l + X_w}$, $S = U_l \cdot I_l$

Założenie takie, dla łuku palącego się stabilnie między elektrodami o stałym odstępem, jest uzasadnione i potwierdzone przez liczne badania [1], [12]. Długość kolumny wyładowania łukowego w reaktorze plazmowym i związana z nią konduktancja dynamiczna ulegają zmianom w czasie cyklu pracy reaktora. Stabilność wyładowań, przebieg napięcia i prądu kolumny łukowej i jej dynamiczna konduktancja, zależą od impedancji wewnętrznej źródła zasilania. Wyniki analizy układu reaktor plazmowy - układ zasilający, z uwzględnieniem zmian dynamicznej konduktancji reaktora wynikającej ze zmian długości kolumny wyładowania, przedstawiono w rozdziale 3. Zaproponowano tam model matematyczny wyładowań w reaktorze GlidArc przy wymuszeniu harmonicznym.

3. Model matematyczny ślizgających się wyładowań łukowych w reaktorze plazmowym GlidArc

Teoria łuku elektrycznego jako wyładowania samoistnego w gazie jest stosunkowo dobrze opisana w bogatej literaturze [1], [4], [11], [12], [40], [42], [47]. Klasyczny łuk elektryczny charakteryzuje się dużą gęstością prądu, rzędu 10^5 - 10^{10} A/m² i małym spadkiem napięcia katodowego, który przy podanych gęstościach prądu zawiera się w granicach (5-10)V [6]. Jeżeli o energii wyładowania łukowego decydują zjawiska przyelektrodowe, łuk nazywamy krótkim, natomiast długim, gdy przeważa energia wydzielana w kolumnie łukowej. Zjawiska towarzyszące wyładowaniu łukowemu są niezwykle złożone a ich analiza wymaga wyznaczenia rozkładu pól elektromagnetycznego i temperaturowego, ich wzajemnych sprzężeń oraz rozwiązania równań przepływu energii, ładunku i masy [11], [12]. Nieliniowy charakter zjawisk w łuku elektrycznym, konieczność uwzględnienia i powiązania ze sobą fizycznych parametrów zjonizowanego gazu, warunków chłodzenia łuku i elektrycznych parametrów układu zasilania sprawiają, że opis tych zjawisk jest trudny i zawsze zmusza do przyjęcia znacznych założeń upraszczających, oraz korzystania z wyznaczonych empirycznie charakterystyk łuku.

Próby analitycznego ujęcia statycznych i dynamicznych charakterystyk wyładowania łukowego były podejmowane przez wielu autorów [1], [2], [4], [44], [47], [55], [56]. Dotyczą one charakterystyki prądowo-napięciowej łuku $u_l=f(i_l)$, której analityczne określenie pozwala badać wzajemne oddziaływanie wyładowania łukowego i układu zasilającego. Można też analizować wpływ różnych parametrów samego wyładowania, takich jak: długość łuku, prędkość przepływu i rodzaj gazu, materiał elektrod, prąd wyładowania, na charakterystyki układu zasilania.

Istotna część teorii łuku elektrycznego powstała i jest w dalszym ciągu rozwijana w badaniach dotyczących teorii zwarć i procesów łączeniowych [2], [11], [24], [73]. Podstawowym problemem w badaniu obwodów z komutacją jest gaszenie wyładowania łukowego. Modele łuku są tutaj tak konstruowane, aby możliwie poprawnie zbadać zjawiska zachodzące w pobliżu przejścia natężenia prądu przez zero – miejscu naturalnego gaszenia łuku. W przypadku reaktora plazmowego głównym celem analizy jest taki dobór parametrów wyładowania, geometrii elektrod komory wyładowczej reaktora i parametrów zewnętrznego obwodu zasilającego, aby zapewnić jego nieprzerwane palenie oraz dużą wydajność i wysoką sprawność energetyczną procesu. W reaktorze plazmowym typu GlidArc napięcie na kolumnie łukowej jest znacznie wyższe niż w łuku płonącym stabilnie między elektrodami o stałym odstępie, i sięga kilkuset V, podczas gdy prąd wyładowania jest znacznie niższy niż w klasycznym łuku i nie powinien przekraczać 10A [18], [24]. Takie parametry nie pozwalają na proste wykorzystanie modeli matematycznych wyładowań łukowych opracowanych dla innych reaktorów plazmowych.

Przyjęcie odpowiedniego modelu łuku elektrycznego umożliwia badanie charakterystyk samego wyładowania oraz jego oddziaływania na układ zasilający.

3. 1. Wybór modelu

Istnieją dwa główne podejścia do modelowania wyładowania łukowego [64], [69]. Pierwsze z nich to podejście traktujące łuk elektryczny jako „czarną skrzynkę” o zadanej nieliniowej charakterystyce prądowo - napięciowej (*black-box approach*) i drugie, polegające na całkowaniu po objętości równania opisującego bilans energii w kolumnie łukowej. Oba podejścia mają wspólny rodowód. Jest nim prawo zachowania energii i wynikającego z niego równanie bilansu mocy łuku elektrycznego [1], [5], [11]:

$$E(J_p + J_e) = eU_i \left[\frac{\partial n_e}{\partial t} - \frac{1}{e} \operatorname{div}(J_e) \right] + P_i(T) + \operatorname{div}[\lambda(T) \operatorname{grad}(T)] + \gamma(T) c_p(T) W \|\operatorname{grad}(T)\| + \gamma(T) c_p(T) \frac{dT}{dt}, \quad (3.1)$$

gdzie:

$E(J_p + J_e)$ – moc wydzielona w jednostce objętości łuku w postaci ciepła *Joule'a*;

$eU_i \frac{\partial n_e}{\partial t}$ – moc tracona na powiększenie liczby elektronów w jednostce objętości;

$U_i \operatorname{div}(J_e)$ – moc wydzielona w jednostce objętości łuku wskutek rekombinacji;

$P_i(T)$ – moc tracona z jednostki objętości na promieniowanie;

- $div[\lambda(T)grad(T)]$ – moc odprowadzona z jednostki objętości łuku na drodze przewodnictwa;
 $c_p(T)W |grad(T)|$ – moc odprowadzona z jednostki objętości łuku przez konwekcję;
 J_e, J_p – gęstość prądu, odpowiednio, elektronów i jonów dodatnich;
 W – masa właściwa łuku;
 $c_p(T) \frac{dT}{dt}$ – moc odpowiadająca zmianie temperatury jednostki objętości łuku;
 $\lambda(T)$ – współczynnik przewodzenia ciepła;
 $c_p(T)$ – ciepło właściwe gazu;
 $\gamma(T)$ – ciężar właściwy gazu,
 U – potencjał jonizacji,
 E – gradient napięcia łuku.

Równanie (3.1) jest bardzo trudne do analizy, ze względu na złożoną zależność poszczególnych jego członów od temperatury T . Aby rozwiązać równanie (3.1) należy na wstępie założyć geometrię kolumny łukowej, przyjąć warunki brzegowe, określić rodzaj przepływu gazu oraz rozkład temperatury w kolumnie łukowej. Wymaga to uprzedniego przygotowania baz danych, dotyczących rozkładu parametrów gazu w obszarze kolumny łukowej, które można uzyskać jedynie na drodze eksperymentalnej oraz komputerów o wielkich możliwościach obliczeniowych.

W podejściu makroskopowym (*black - box*) punktem wyjścia jest termodynamiczna równowaga wyładowania łukowego.

Całkując równanie (3.1), po całej objętości, łuku otrzymuje się równanie opisujące bilans energii dla jednostki objętości łuku w stanie dynamicznym:

$$dQ = E \cdot i_t \cdot dt - P \cdot dt, \quad (3.2)$$

gdzie:

dQ – przyrost energii wewnętrznej jednostki długości kolumny łukowej w badanym przedziale czasu

$P \cdot dt$ – energia odprowadzona z łuku w rozpatrywanym przedziale czasu,

I_t – prąd łuku,

Przyjmując, że konduktancja dynamiczna G jednostki długości kolumny łukowej jest funkcją energii wewnętrznej Q , według:

$$G = \frac{i_t}{E} = f(Q), \quad (3.3)$$

i uwzględniając zależność (3.2), po przekształceniach otrzymuje się równanie na konduktancję dynamiczną jednostki długości kolumny łukowej [11]:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau P} (E i_t - P), \quad (3.4)$$

w którym, wielkość τ , zwana stałą czasową łuku, jest funkcją konduktancji dynamicznej $G(t)$ jednostki długości łuku i prądu łuku, zgodnie z następującą zależnością:

$$\tau(G, i_t) = \frac{dG}{dQ} \frac{G}{P(g, i_t)}.$$

U podstaw matematycznego modelowania łuku elektrycznego leżą dwa klasyczne – dynamiczne modele łuku: *Cassie* [4] i *Mayra* [56]. *Cassie* rozwiązał równanie (3.4), zakładając stałość temperatury łuku w czasie i przestrzeni, a zatem założył stałą energię Q zawartą w łuku. W mo-

delu *Cassie* konduktancja dynamiczna jednostki długości kolumny łuku traktowana jest jako proporcjonalna do energii łuku Q

$$G = c_1 \cdot Q(t). \quad (3.5a)$$

Model *Mayra* opiera się na założeniu, że temperatura łuku zmienia się w czasie i przestrzeni, natomiast stała, i równa P_o , jest wartość mocy oddawanej z jednostki długości łuku. W związku z takim założeniem konduktancja dynamiczna w modelu *Mayra* zmienia się eksponencjalnie w funkcji energii Q ,

$$G = c_2 e^{\frac{Q(t)}{Q_o}}, \quad (3.5b)$$

gdzie:

c_1, c_2 – stałe

Q_o – stała wartość energii, którą trzeba doprowadzić do kolumny łukowej, aby zmienić jej rezystancję w stosunku 1:e [11].

Model *Cassie* zakłada, że straty ciepła w kolumnie łukowej występują jedynie wskutek konwekcji i dobrze opisuje zjawiska w łuku elektrycznym o dużych prądach, co dla prądu przemiennego oznacza przedział czasu w pobliżu jego amplitudy. Model *Mayra* uwzględnia straty mocy wskutek przewodności termicznej i symuluje charakterystyki wyładowania łukowego w pobliżu przechodzenia prądu łuku przez zero, a więc zjawiska o małej intensywności [11], [45], [64], [69].

Te klasyczne modele były modyfikowane i uzupełniane przez wielu badaczy [39], [43], [55], [66], [73], przy czym modyfikacje te dotyczyły przebiegu dynamicznej konduktancji łuku, stałej czasowej i mocy odbie-

ranej z łuku w zależności od: rodzaju wymuszenia, sposobu odbierania ciepła z kolumny łukowej, geometrii i materiału elektrod reaktora plazmowego. Zawsze jednak rozwiązanie nieliniowych równań różniczkowych, opisujących wyładowanie łukowe, wymaga znacznych założeń upraszczających, a występujące w równaniach współczynniki muszą być wyznaczane doświadczalnie, na podstawie pomiarów w układzie rzeczywistym. Dla celów analizy obwodu z łukiem elektrycznym, właściwości odbiornika łukowego określa się na podstawie jego dynamicznej charakterystyki zewnętrznej, która przedstawia zależność napięcia łuku u_l od jego prądu $i_l=f(i_l)$.

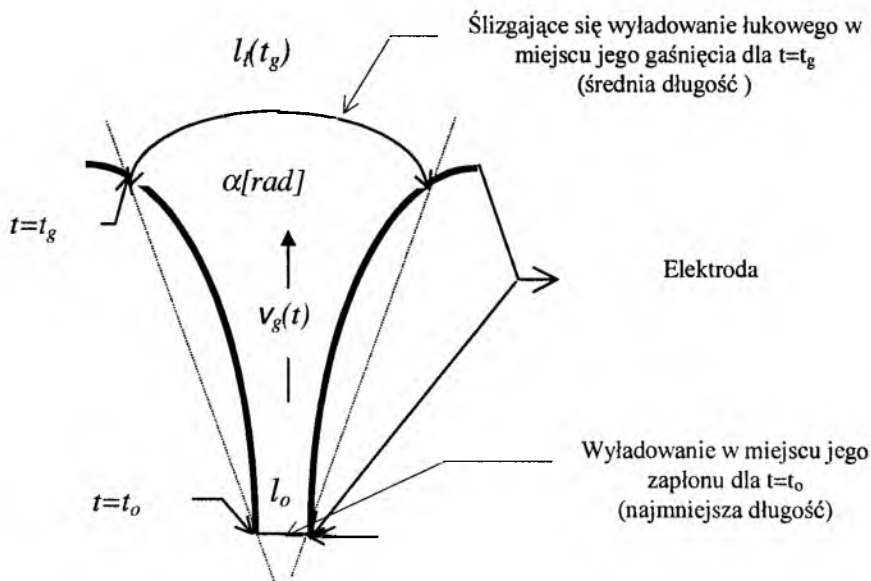
Autorzy badający obwody elektryczne z łukiem przyjmowali różne zależności na napięcie łuku podczas wyładowania łukowego [11], [39], [89]. Dla celów analizy obwodów komutacyjnych z łukiem niskonapięciowym, często zakłada się, że napięcie międzyelektrodowego jest stałe podczas wyładowania łukowego. Podobnie często przyjmuje się, że napięcie łuku zmienia się liniowo w funkcji czasu, zaś przy analizowaniu obwodów z łukiem przy wymuszeniu harmonicznym, naturalne jest założenie prostokątności napięcia międzyelektrodowego podczas wyładowania i jego aproksymacja szeregiem Fouriera [2]. Analiza oscylogramów napięcia łuku płonącego stabilnie między elektrodami o stałym odstępem w obwodzie o dużej reaktancji przy wymuszeniu harmonicznym wskazuje, że taka aproksymacja jest często uzasadniona [24], [39].

W przedstawianych w literaturze modelach wyładowania łukowego długość wyładowania jest najczęściej traktowana jako stały parametr $l_l=const$. Jedną z pierwszych zależności na napięcie łuku, uwzględniającą jego długość, podała Ayrton [43]:

$$u_l = a + b \cdot l_l + \frac{c + d \cdot l_l}{i_l}, \quad (3.6)$$

gdzie: l_l – długość łuku,
 a, b, c i d – stałe parametry wyznaczone doświadczalnie,
 i_l – natężenie prądu łuku

Zależność tę przyjmowali i modyfikowali w swych pracach liczni autorzy [2], [25], [43]. W analizowanym reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, długość wyładowania zmienia swą wartość nawet kilkunastokrotnie w czasie jednego cyklu pracy reaktora, w stosunku do długości wyładowania w chwili zapłonu (rys. 3.1). Wynika to z geometrii elektrod, wymuszonego przepływu gazu i charakterystyki źródła zasilania.



Rys. 3.1 Uproszczony widok elektrod reaktora plazmowego GlidArc z zaznaczonymi długościami wyładowania w miejscu zapłonu $t=t_o$ i w miejscu gaśnięcia $t=t_g$

Moc reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem można zwiększyć poprzez wydłużenie wyładowania. Uzyskuje się je dzięki wymuszonemu przepływowi gazu i wyższemu napięciu źródła zasilającego. Innym sposobem zwiększenia mocy reaktora jest powiększanie wartości prądu wyładowania łukowego, które może jednak prowadzić do znacznego zwiększenia temperatury gazu w przestrzeni międzyelektrodowej i wpłynąć niekorzystnie na proces jego obróbki.

Znaczna długość ślizgającego się wyładowania łukowego, oraz jej zmiana podczas każdego cyklu, wpływa na przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej reaktora plazmowego GlidArc i powinna być uwzględniana w jego modelu matematycznym. Długość kolumny plazmy l_l jest różna od odległości między elektrodami reaktora plazmowego i wpływa na nią wiele czynników. Kolumna plazmowa podlega nie tylko siłom związanym z wymuszonym przepływem gazu, ale także siłom gazo-dynamicznym spowodowanym unoszeniem się nagrzanej plazmy gazowej oraz siłom elektrodynamicznym, wynikającym z oddziaływania pola elektromagnetycznego na przepływ gazu elektronowego i jonowego [43].

Ruch łuku w reaktorze i wydłużanie kolumny wyładowania powodują jej oziębienie oraz zmniejszają stabilność ślizgającego się wyładowania łukowego i mogą prowadzić do zgaszenia wyładowania. Mała stabilność wyładowania w reaktorze plazmowym, w wyniku której niewielkie przypadkowe zaburzenia powodują duże zmiany kształtu wyładowania sprawia, że tor łuku jest bardzo skomplikowany, a określenie jego długości bądź prędkości, czy to teoretycznie czy doświadczalnie, jest praktycznie niemożliwe.

Autorka zaproponowała, aby długość łuku podczas jednego cyklu pracy reaktora, przy stałym przepływie gazu i określonej geometrii elektrod, przedstawić jako funkcję czasu $l_l=f(t)$, w przedziale od czasu zapłonu t_o do czasu gaśnięcia t_g (rys. 3.1), i wyrazić zależnością:

$$l_l(t) \equiv l_o + \alpha \cdot v_g \cdot t, \quad (3.7)$$

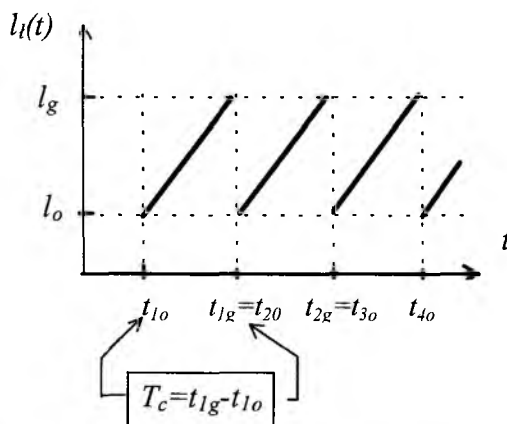
gdzie: l_o – odstęp elektrod w miejscu zapłonu wyładowania;

α – kąt rozchylenia elektrod reaktora (rys. 3.1);

v_g – prędkość wymuszonego przepływu gazu w reaktorze;

Założono przy tym, że prędkość kolumny plazmowej jest równa prędkości gazu, a promień krzywizny elektrod jest na tyle duży, aby uznać że kąt rozchylenia elektrod jest stały.

Przyjmując w zależności (3.7), stałą prędkość przepływu gazu v_g oraz zakładając brak przerw pomiędzy kolejnymi cyklami pracy reaktora, zmiany długości wyładowania łukowego w funkcji czasu przedstawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Zmiana długości wyładowania łukowego w kolejnych cyklach pracy reaktora

Długość wyładowania w miejscu jego gaśnięcia (dla $t=t_g$), przy stałej geometrii elektrod, jest ograniczona wartością napięcia źródła zasilającego, a cykl pracy reaktora kończy się gdy:

$$u_l(t_g) = u_{zr}(t_g) - u_{RL}(t_g),$$

gdzie: $u_{RL}(t)$ – napięcie na impedancji wewnętrznej źródła zasilającego.

Ponadto przyjęto, że czas gaśnięcia łuku t_{lg} , po pierwszym cyklu procesu, jest jednocześnie początkiem następnego cyklu pracy reaktora – czyli, że dla $t_{20} = t_{lg}$ pojawia się kolejny impuls zapłonowy.

W rzeczywistości, po zgaśnięciu łuku, tj. po czasie t_g , następny cykl zaczyna się, gdy napięcie osiągnie wartość napięcia zapłonu. W układzie dwuelektrodowym czas od zgaśnięcia łuku do jego zapalenia się w następnym cyklu będzie nie dłuższy niż 1/4 okresu, tj. przy $f=50\text{Hz}$ $t_{20} - t_{lg} \leq 5\text{ms}$. W reaktorach z układem zapłonowym czas przerwy bezprądowej jest znacznie krótszy i może być pominięty.

Uwzględniając zmianę długości wyładowania, podczas jednego cyklu pracy reaktora, oraz przedstawione wyżej uproszczenia, zaproponowano modyfikację dynamicznej charakterystyki prądowo–napięciowej ślizgającego się wyładowania łukowego, podaną przez Ayrton. Charakterystykę $u_l = f(i_l)$ wyrażono następującym równaniem:

$$u_l(t) = [U_o + E_o \cdot l_l(t)] \cdot \text{sign}(i_l) + \frac{P_o + Q_o \cdot l_l(t)}{i_l(t)} \quad (3.8)$$

gdzie:

U_o, E_o, P_o, Q_o – stałe wyznaczone empirycznie z charakterystyk prądowo–napięciowych ślizgającego się wyładowania łuko-

wego w reaktorze plazmowym ,

$U_o + E_o \cdot l_o$ – napięcie między elektrodami reaktora dla odstepu elektrod l_o w miejscu zapłonu wyładowania, V (rys.3.1),

P_o – moc czynna wyładowania, w chwili inicjacji zapłonu, W;

E_o – natężenie pola elektrycznego w kolumnie łukowej, V/m;

Q_o – gęstość liniowa mocy odbieranej z jednostki długości kolumny łukowej w wyniku przewodzenia ciepła, W/m;

i_l – prąd wyładowania, A;

$l(t)$ – długość ślizgającego się wyładowania łukowego, m;

$sign(i_l)$ – znak prądu łuku uwzględniający, że wyładowanie w reaktorze zapala się i gaśnie w każdej połowce sinusoidalnego napięcia zasilającego;

Przy konstruowaniu modelu ślizgającego się wyładowania łukowego, opisanego równaniem (3.8), przyjęto następujące założenia upraszczające:

- skuteczna wartość natężenia prądu jest stała w trakcie przesuwania się wyładowania wzdłuż elektrod,
- prędkość gazu i prędkość wyładowania są jednakowe, $v_g = v_l$,
- natężenia pola elektrycznego E_o w kolumnie łukowej jest stałe,
- gęstość liniowa mocy Q_o odbieranej z jednostki długości kolumny łukowej w wyniku przewodzenia ciepła jest stała.

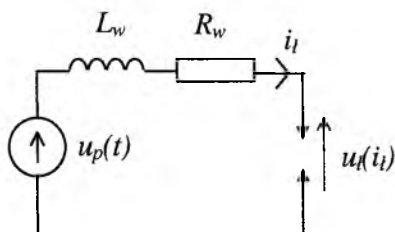
Takie założenia upraszczające są przyjmowane także w pracach wielu autorów, prowadzących badania nad modelami ślizgających się wyładowań łukowych [14], [24], [59], ich stabilnością [23], [25], jak również

przy modelowaniu klasycznych wyładowań łukowych [1], [12], [51], [64].

Charakterystykę prądowo-napięciową ślizgającego się wyładowania w reaktorze plazmowym GlidArc, opisaną równaniem 3.8, wykorzystano w modelu matematycznym obwodu elektrycznego z łukiem przy wymuszeniu harmonicznym i do analizy charakterystyk układu. Analiza pozwoliła wyznaczyć korzystne obszary pracy układu, oraz zbadać wpływ geometrycznych parametrów elektrod reaktora, wymuszonej prędkości gazu oraz parametrów układu zasilającego na pracę reaktora. Wyniki analizy przedstawiono w rozdziale 3.2 i porównano je z wynikami badań przeprowadzonych na modelach laboratoryjnych.

3. 2. Model matematyczny układu reaktor plazmowy - źródło

Model matematyczny układu, reaktor plazmowy-źródło zasilające, otrzymano odwzorowując go jednofazowym schematem zastępczym (rys. 3.3), w którym $u_p(t)$ jest napięciem strony wtórnej jednofazowego transformatora zasilającego reaktor, R_w i L_w stanowią rezystancję i indukcyjność transformatora, zaś reaktor plazmowy przedstawiono w postaci nieliniowej rezystancji, której charakterystyka prądowo-napięciowa opisana jest równaniem 3.8.



Rys.3.3. Jednofazowy schemat zastępczy obwodu z łukiem

Dla obwodu z rys. 3.3 zapiszemy:

$$u_p(t) = R_w i_l + L_w \frac{di_l}{dt} + u_l, \quad (3.9)$$

gdzie:

$u_p(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$ – wartość chwilowa przewodowego napięcia zasilającego,

R_w i L_w – rezystancja i indukcyjność układu zasilania,

u_l – napięcie łuku.

Uwzględniając zależność na napięcie łuku wyrażoną równaniem (3.8) równanie obwodu (3.9) przyjmie postać:

$$U_m \sin(\omega t + \varphi_u) = L_w \frac{di_s(t)}{dt} + R_w i_s(t) + [U_o + E_o l_s(t)] \text{sign}(i_s) + \frac{P_o + Q_o l_s(t)}{i_s(t)}. \quad (3.10)$$

Równanie (3.10) jest nieliniowym równaniem różniczkowym pierwszego rzędu, ale jego rozwiązanie analityczne, bez przyjęcia dodatkowych założeń upraszczających, jest niemożliwe z uwagi na nieliniowość charakterystyki prądowo-napięciowej łuku oraz osobliwości występujące w rozwiązaniu.

Równanie (3.10) rozwiązano numerycznie wykorzystując program MathCAD 2.0. W celu weryfikacji wyników analizy numerycznej, obliczenia przeprowadzono dla parametrów równania wyznaczonych dla modelu laboratoryjnego złożonego z transformatorów o danych zawartych w tabelicy 4.1 i reaktora plazmowego o geometrii elektrod przedstawionej na rys. 3.1. Pozostałe parametry modelu, dla których przeprowadzono obliczenia podano w tabelicy 3.2.

Tablica 3.2 Parametry modelu reaktora

<i>Wielkość</i>	<i>Jednostka</i>	<i>Wartość</i>
U_o	[V]	2200
E_o	[V/m]	10000
P_o	[W]	200
Q_o	[W/m]	2000
α	[rad]	0,261
V_g	[m/s]	5, 10, 15, 20, 25
l_o	[m]	$10 \cdot 10^{-3}$
U_m	[V]	4000,5000,6000,7000

3. 3. Wyniki analizy numerycznej

Obliczenia według modelu opisanego równaniem (3.10) przeprowadzono dla dwóch przypadków:

- dla stałej odległości między elektrodami reaktora l_o , równej odległości elektrod w miejscu zapłonu wyładowania. Założenie to równoznaczne jest przyjęciu stałej długości kolumny łukowej podczas przesuwania się wyładowania wzdłuż elektrod reaktora plazmowego;
- dla długości kolumny łukowej zmieniającej się wraz z przesuwaniem się wyładowania wzdłuż elektrod i będącej funkcją prędkości przepływu gazu i czasu, zgodnie z zależnością (3.7).

Wyniki analizy przedstawiono w postaci chwilowych przebiegów prądu, napięcia, konduktancji i mocy chwilowej wyładowania. Dla obu przypadków przeprowadzono analizę wpływu reaktancji i rezystancji wewnętrznej układu zasilania na wymienione przebiegi. Wykreślono charakterystyki prądowo-napięciowe łuku oraz przedstawiono wpływ wybranych parametrów obwodu i łuku na konduktancję bądź rezystancję kolumny łukowej oraz moc czynną wyładowania.

Na rysunku 3.4 przedstawiono przebiegi prądu wyładowania i napięcia na elektrodach reaktora plazmowego w pierwszych dwóch cyklach pracy analizowanego układu, w którym uwzględniono zmienną długość wyładowania. Zaznaczono chwilę, w której pojawia się kolejny impuls zapłonowy. Chwilowa wartość napięcia między elektrodami reaktora wzrasta w kolejnych okresach cyklu wraz z przesuwaniem się wyładowania wzdłuż elektrod, aż do chwili gdy napięcie źródła nie jest w stanie dłużej podtrzymać wyładowania palącego się w miejscu, gdzie odstęp elektrod jest kilkakrotnie większy niż w chwili zapłonu i wyładowanie gaśnie. Prawie jednocześnie, po czasie nie dłuższym niż $1/12$ okresu przy $f=50\text{Hz}$, pojawia się kolejny impuls zapłonowy i rozpoczyna się następny cykl pracy reaktora.

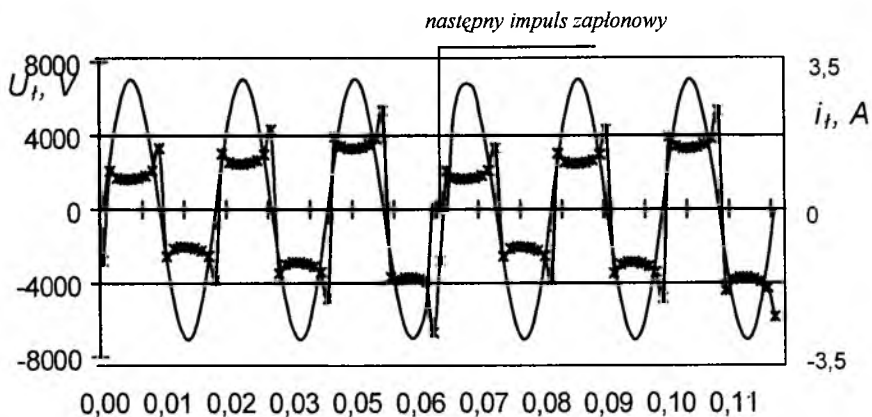
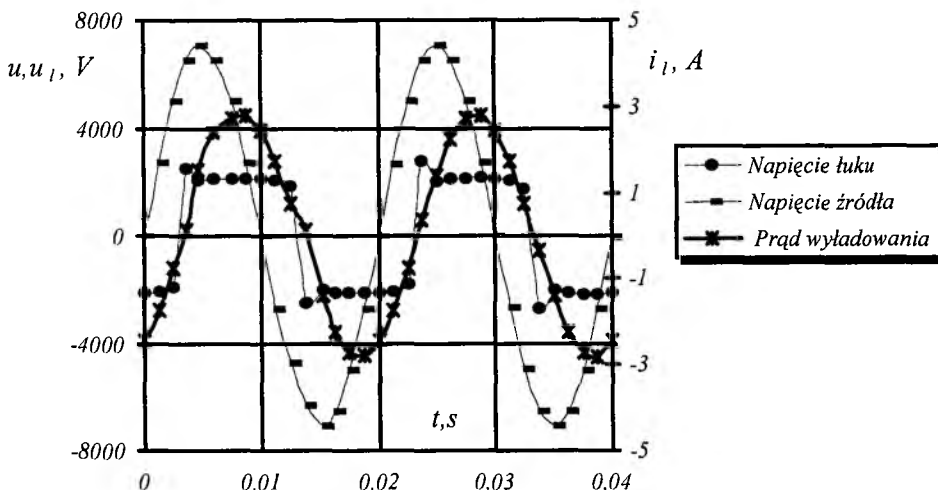


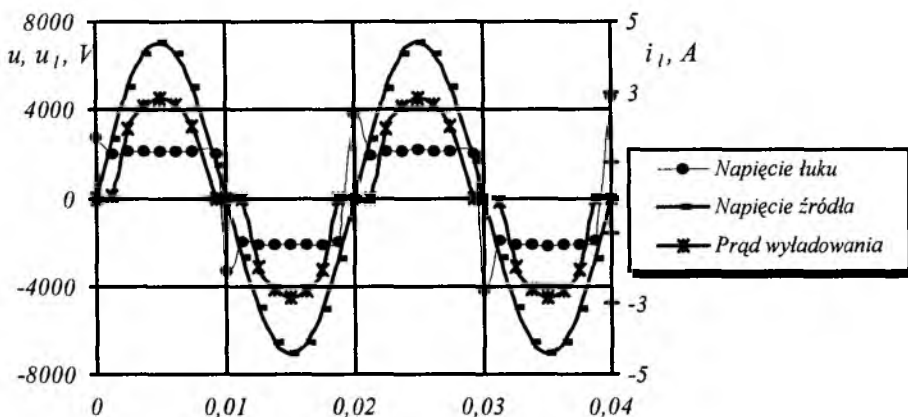
Fig. 3.4. Chwilowe przebiegi napięcia i natężenia prądu wyładowania w pierwszych dwóch cyklach pracy reaktora ($v_g=20\text{ m/s}$, $U_m=5000\text{V}$, $I_m=3\text{A}$)

Na rysunkach (3.5) i (3.6) przedstawiono przebiegi napięcia zasilającego dla obwodu z dużą (rys. 3.5) i małą (rys. 3.6) reaktancją X_w źródła zasilającego. W obwodzie z niewielką reaktancją wewnętrzną (rys. 3.6) w

przebiegu prądu widoczne są przerwy bezprądowe podczas każdego przejścia prądu łuku przez zero, zaś w napięciu wyraźne „piki” zapłono-
we.



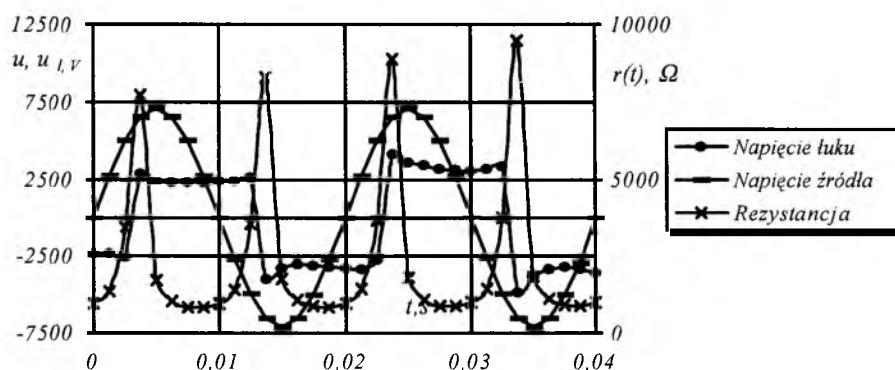
Rys. 3.5. Chwilowe przebiegi natężenia prądu i napięcia łuku w obwodzie o dużej reaktancji wewnętrznej źródła, $U=5000\text{ V}$, $I=2\text{ A}$, $v_g=10\text{ m/s}$.



Rys. 3.6 Chwilowe przebiegi prądu i napięcia łuku w obwodzie o małej reaktancji wewnętrznej źródła, ($U_m=5000\text{ V}$, $I_m=3\text{ A}$, $v_g=10\text{ m/s}$.)

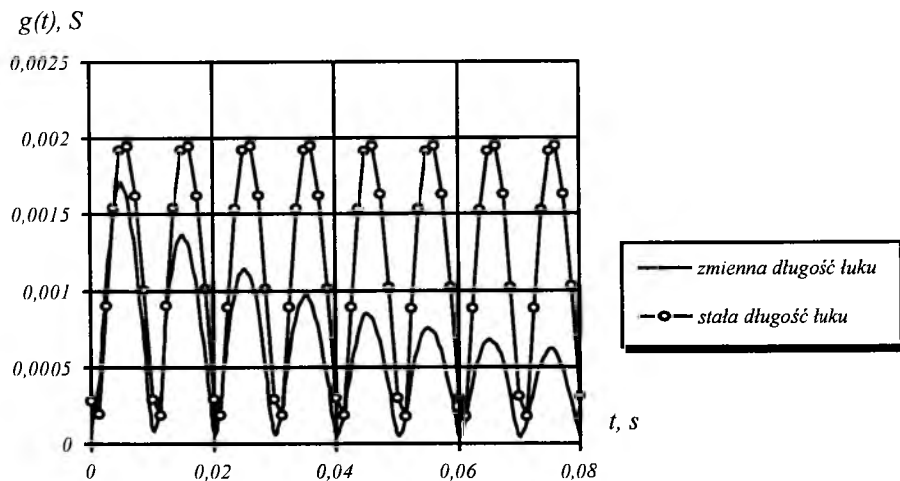
W obwodzie o przewadze reaktancji ($X_{wew} \gg R_t$) wzrost napięcia, ponad wartość napięcia łuku, w czasie każdego przejścia przez zero prądu łuku, w tym przypadku praktycznie sinusoidalnego, jest niewielki. Przebieg rezystancji dynamicznej wyładowania łukowego w reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym przedstawiono na rysunku 3.7.

Na rysunku 3.8 przedstawiono wpływ zmienności długości kolumny łukowej na przebieg dynamicznej konduktancji łuku $g(t)$, w czasie jednego cyklu pracy reaktora plazmowego. Przy zmiennej długości kolumny łukowej konduktancja łuku maleje w miarę przesuwania się wzdłuż elektrod, co tłumaczy się wzrostem napięcia i długości kolumny łukowej wraz z przesuwaniem się wyładowania łukowego wzdłuż elektrod reaktora (Rys. 3.9).

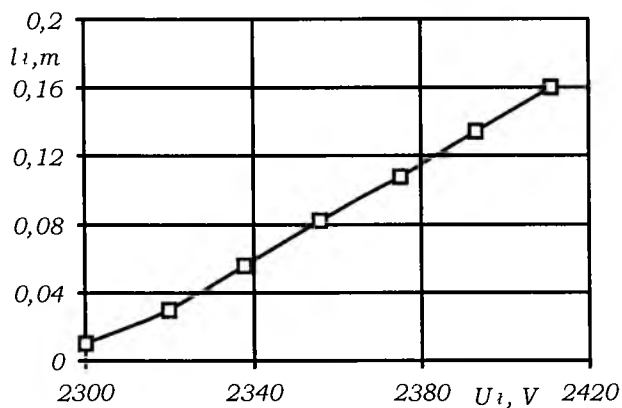


Rys. 3.7. Przebiegi napięcia zasilającego $u(t)$, napięcia łuku $u_l(t)$ oraz rezystancji dynamicznej łuku $r(t)$ w obwodzie reaktancyjnym, ($U_m=5000V$, $I_m=3A$, $v_g=10m/s$).

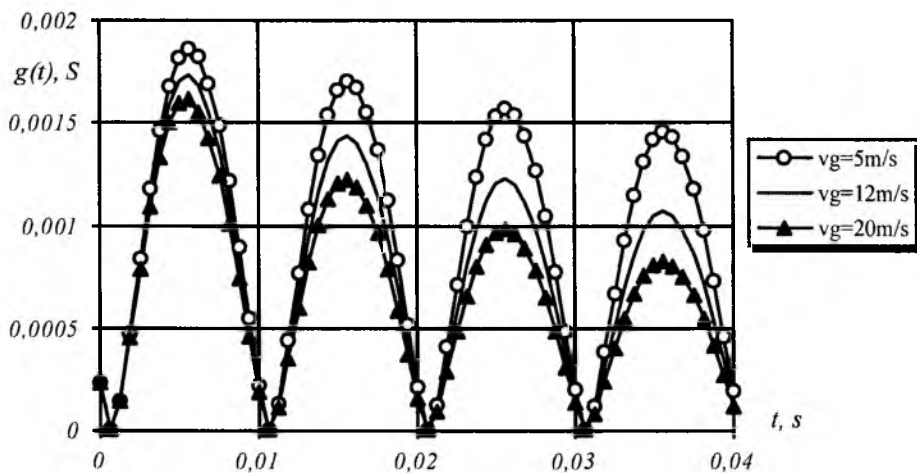
Przebiegi dynamicznej konduktancji wyładowania dla trzech różnych prędkości gazu w badanym reaktorze przedstawiono na rysunku 3.10.



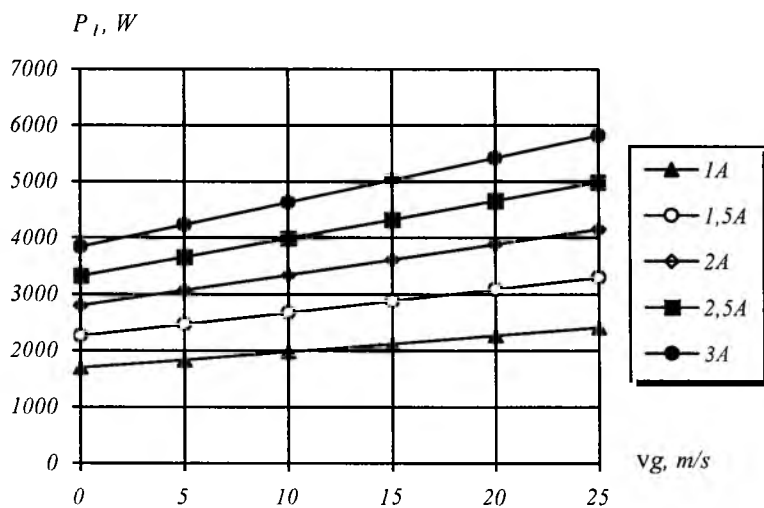
Rys. 3.8. Wpływ zmiennej długości kolumny łukowej na jej dynamiczną konduktancję $g(t)$ ($U_m=5000V$, $I_m=3A$, $v_g=10m/s$, $l=10^{-2}m$)



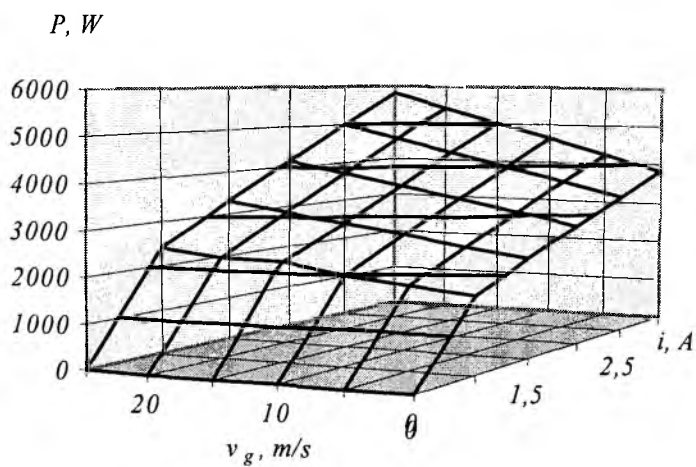
Rys. 3.9. Długość wyładowania łukowego w reaktorze, w funkcji skutecznej wartości napięcia na kolumnie łukowej wyładowania



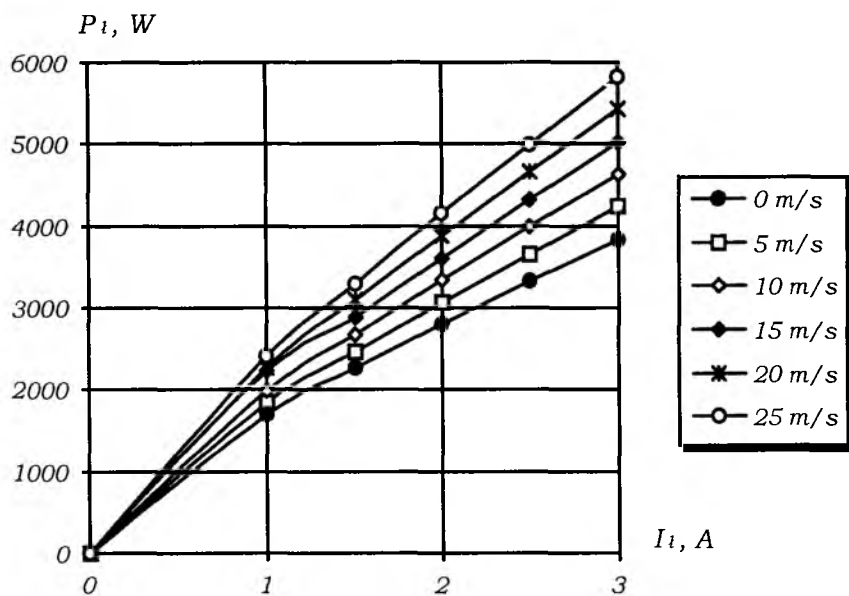
Rys. 3.10. Wpływ prędkości gazu v_g na konduktancję kolumny łukowej w reaktorze GlidArc



Rys. 3. 11. Moc czynna wyładowania łukowego w reaktorze plazmowym w funkcji prędkości przepływu gazu dla różnych wartości skutecznych prądu wyładowania łukowego.



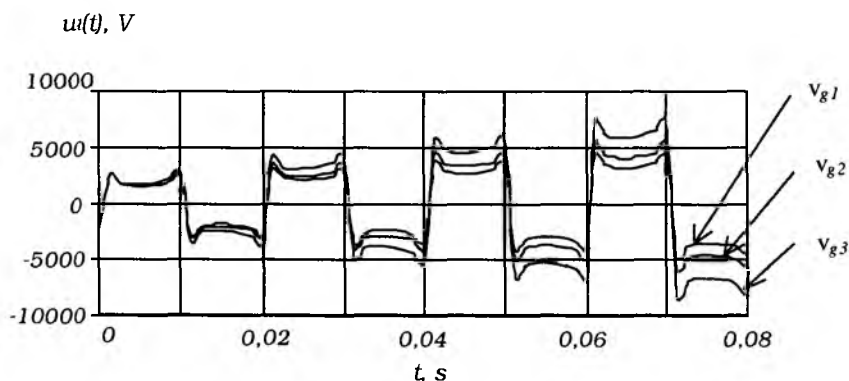
Rys. 3.12. Moc wyładowania typu „Gliding Arc” w funkcji prądu i prędkości przepływu gazu



Rys. 3.13. Moc czynna łuku w funkcji prądu dla różnych prędkości przepływu gazu v_g

Konduktancja chwilowa przestrzeni międzyelektrodowej reaktora zmienia się w czasie cyklu pracy wraz z prędkością przepływu gazu w szerokich granicach. W analizowanym modelu amplituda konduktancji maleje w czasie cyklu pracy trzykrotnie. Przepływ gazu powoduje intensywniejsze chłodzenie kolumny łukowej i wzrost mocy czynnej wyładowania, tak jak przedstawiono na rysunkach 3.11, 3.12 oraz 3.13.

Jak wynika z rys. 3.11, ze wzrostem prędkości przepływu gazu, poddawanego obróbce, rośnie moc czynna przekazywana ze źródła zasilania do strefy wyładowań, przy czym szybkość przyrostu mocy zależy od prądu wyładowania i jest większa dla większych wartości prądu.

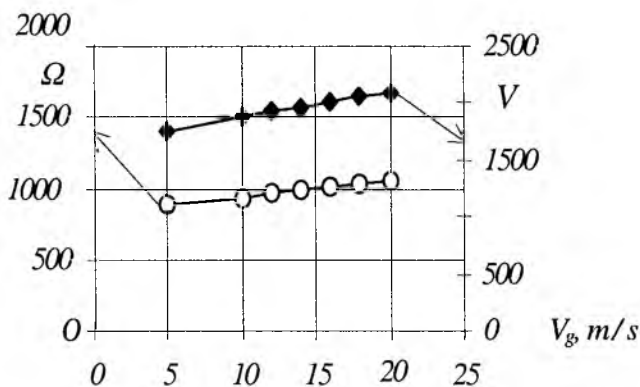


Rys. 3.14. Wpływ prędkości przepływu gazu na napięcie wyładowania łukowego w reaktorze plazmowym, $v_{g1} < v_{g2} < v_{g3}$.

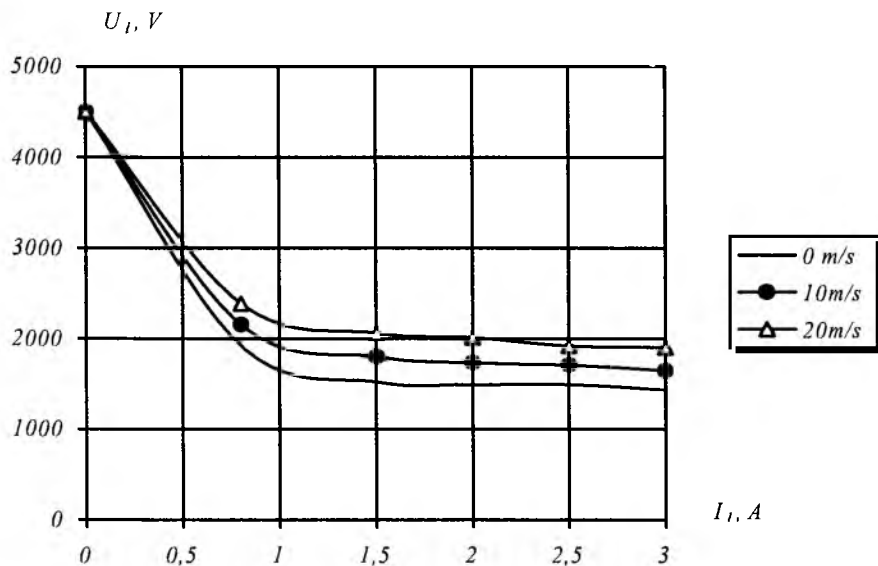
Statyczna, uśredniona za cykl pracy, rezystancja wyładowania łukowego zmienia się wraz z prędkością przepływu gazu w niewielkim stopniu.

Pięciokrotne zwiększenie prędkości przepływu gazu powoduje zaledwie 20% zwiększenie rezystancji statycznej przestrzeni międzyelektrodowej. Zastąpienie zatem łuku elektrycznego statyczną rezystancją, wyznaczaną ze stosunku skutecznych wartości napięcia i prądu wyładowania łukowe-

go, stosowane często w analizie obwodów elektrycznych z łukiem elektrycznym, może mieć miejsce także przy analizowaniu wyładowania łukowego typu w reaktorze GlidArc.

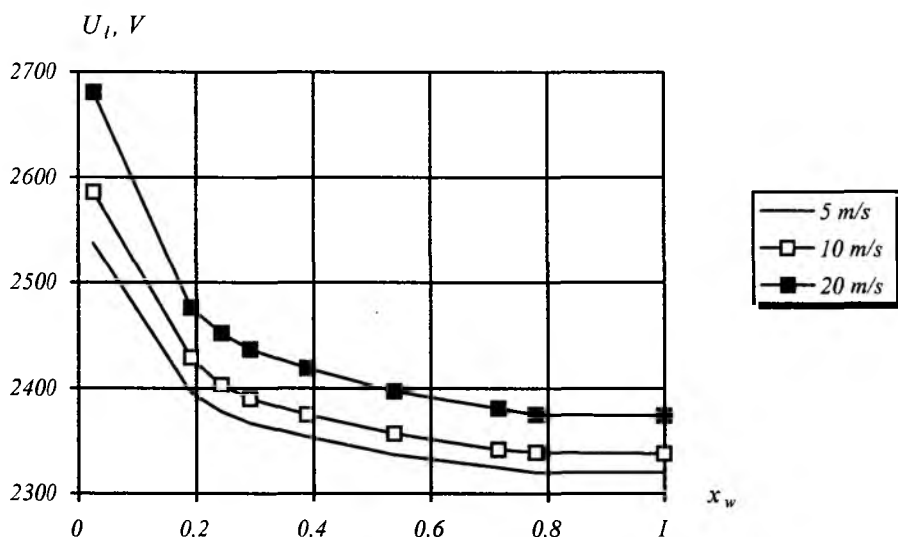


Rys. 3.15. Rezystancja statyczna łuku R_l (O) i napięcie na kolumnie łukowej U_l (◆) w funkcji prędkości przepływu gazu v_g .



Rys. 3.16. Charakterystyka statyczna $U_l = f(I_l)$ wyładowania łukowego typu „GlidArc” dla różnych prędkości v_g przepływu gazu

Zbadano także wpływ reaktancji wewnętrznej obwodu zasilającego na wartość skuteczną napięcia kolumny łukowej dla różnych prędkości przepływu gazu w reaktorze. Przedstawiono te przebiegi na rysunku 3.17 w funkcji względnej reaktancji obwodu zasilającego x_w , przy czym $x_w=0$ odpowiada reaktancji obwodu $\omega L_w=0$, zaś $x_w=1$ jest równoznaczne założeniu rezystancji obwodu zasilającego równej zero – $R_w=0$.



Rys. 3.17. Wpływ reaktancji źródła zasilania x_w i prędkości przepływu gazu v_g na skuteczną wartość napięcia wyładowania przy stałej wartości skutecznej prądu łuku $I_l=2A$

Skuteczna wartość napięcia między elektrodami reaktora plazmowego, podczas wyładowania ślizgowego, zależy m.in. od: prędkości przepływu gazu, długości elektrod i ich geometrii oraz od charakterystyki zewnętrznej transformatorów układu zasilania.

Reaktancja transformatorów zasilacza wpływa na przebiegi chwilowe napięcia międzyelektrodowego i prądu wyładowania. W obwodzie o małej reaktancji wewnętrznej, obserwuje się znacznie większy wzrost

chwilowej wartości napięcia, ponad wartość napięcia łuku przy „przechodzeniu” prądu przez zero, niż w obwodzie o dużej reaktancji. Dotyczy to również przebiegu prądu wyładowania, w którym nie występują praktycznie przerwy bezprądowe, w badanym zakresie wartości reaktancji wewnętrznej transformatorów (30-60%), natomiast są one wyraźne w obwodzie rezystancyjnym.

Aby uzyskać tę samą wartość napięcia skutecznego łuku, przy większej prędkości przepływu gazu, układ zasilania musi mieć większą reaktancję wewnętrzną. Dla układu zasilania o danej reaktancji wewnętrznej oznacza to wzrost wartości skutecznej napięcia na wyładowaniu łukowym dla większych prędkości przepływu gazu (rys. 3.16).

Modyfikacja modelu matematycznego łuku (3.8) oraz zaproponowany model układu reaktor plazmowy-źródło zasilania (3.10), pozwoliły przeprowadzić numeryczną analizę wzajemnego oddziaływania podstawowych parametrów i wielkości fizycznych układu zasilania i ślizgającego się wyładowania łukowego.

Na podstawie powyższej analizy sformułowano wymagania stawiane układom zasilania reaktorów plazmowych, ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, oraz oceniono przydatność znanych układów do zasilania reaktorów plazmowych.

4. Charakterystyka układów zasilania reaktorów plazmowych

Jak wykazano w rozdziale drugim, reaktory plazmowe są odbiornikami o szczególnych cechach i właściwą ich pracę mogą zapewnić tylko specjalne układy zasilania elektrycznego, charakteryzujące się odpowiednimi właściwościami. Wszystkie układy zasilania powinny zapewnić poprawną pracę zasilanych reaktorów oraz dobrze współpracować z siecią zasilającą, nie obniżać jakości energii elektrycznej dla innych odbiorników przyłączonych do sieci, tj. nie odkształcać napięcia i nie wprowadzać jego wahań i asymetrii. Ze względu na nieliniowość charakterystyk reaktorów plazmowych trudno jest pogodzić ich optymalną pracę z poprawną współpracą z siecią zasilającą. Konieczność kompromisu tych przeciwnych wymagań prowadzi do różnorodnych rozwiązań, często bardzo złożonych układów, a przez to mniej sprawnych i bardziej zawodnych.

Dokonamy krótkiego przeglądu układów zasilania reaktorów plazmowych wykorzystywanych w procesach plazmowej obróbki gazów, w których do wytwarzania plazmy stosuje się różne rodzaje wyładowań elektrycznych.

Reaktory plazmowe są stosowane w przemyśle od ponad 100 lat głównie jako palniki plazmowe do cięcia, spawania, obróbki powierzchniowej i produkcji ozonu a ostatnio także do obróbki toksycznych gazów.

Na temat układów zasilania elektrycznego tych reaktorów istnieje bogata literatura [8], [13], [19], [36], [49], [66], [87]. Podstawowym elementem wszystkich układów zasilania reaktorów plazmowych jest transformator umożliwiający współpracę reaktora z siecią elektroenergetyczną. Transformatory o takim przeznaczeniu mają specjalne wykonanie, najczęściej powiększoną reaktancję zwarcia, podmagnesowanie prądem stałym, a ponadto mogą być wyposażone w dławiki, rezystory, transduktory, układy rezonansowe (zasilanie parametryczne) oraz układy tyrystorowe. Dodawanie elementów do transformatora poprawia określone właściwości układu zasilania, ale czyni go bardziej złożonym, a przez to bardziej zawodnym, droższym i na ogół mniej sprawnym. Tam, gdzie jest to możliwe należy dążyć do układów jak najprostszych i o wysokiej sprawności energetycznej.

4.1. Przegląd układów zasilania reaktorów plazmowych

Reaktory plazmowe niezależnie od rodzaju wyładowań elektrycznych wykorzystywanych do wytwarzania plazmy, są odbiornikami energii silnie nieliniowymi o charakterze rezystancyjnym (w przypadku reaktorów z łukiem elektrycznym), bądź rezystancyjno-pojemnościowym (reaktory z wyładowaniami barierowymi, koronowymi) i układ zasilania w energię elektryczną musi spełniać specjalne wymagania, wśród których najważniejsze to:

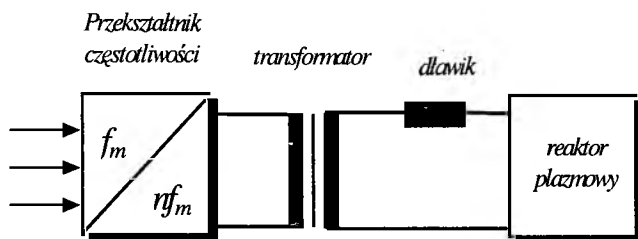
- dostarczać energii elektrycznej o wysokim napięciu i o częstotliwości sieciowej lub podwyższonej ;
- zapewniać wysoką sprawność przekazywania energii do plazmy,

- poprawnie współpracować z siecią zasilającą,
- mieć możliwość regulacji napięcia;
- posiadać możliwość sterowania pracą reaktora plazmowego;
- charakteryzować się niskimi kosztami kapitałowymi i eksploatacyjnymi.
- być prostym i bezpiecznym w obsłudze.

Aby spełnić wymienione wymagania układy zasilania reaktorów plazmowych są zwykle bardzo rozbudowane i zawierają obok transformatora, dławiki, układy kompensacji mocy biernej, regulatory napięcia, przekształtniki częstotliwości, układy zapłonowe.

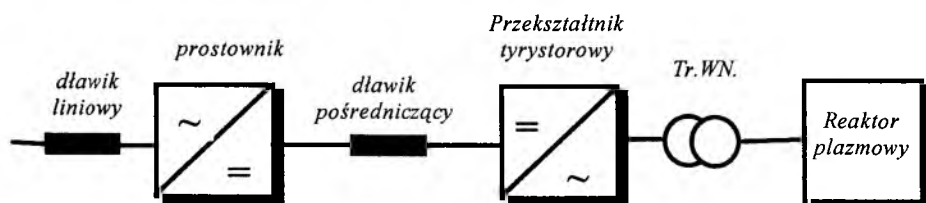
Na rysunku 4.1 przedstawiono układ zasilania reaktorów plazmowych z wyładowaniami barierowymi, o częstotliwości sieciowej lub podwyższonej i sinusoidalnym napięciu. W układach o podwyższonej częstotliwości, jako przekształtniki częstotliwości, stosowane są statyczne magnetyczne mnożniki częstotliwości pracujące przy częstotliwościach od 150-450 Hz oraz układy tyrystorowe, zwykle na częstotliwość 600-1000 Hz. Reaktor plazmowy z wyładowaniami barierowymi jest odbiornikiem energii o charakterze czynno-pojemnościowym i układy przemysłowe są zwykle wyposażone w dodatkowe dławiki do kompensacji mocy biernej pojemnościowej reaktora.

Układy zasilania reaktorów plazmowych mogą być budowane jako jednofazowe i trójfazowe. W przypadku układu trójfazowego spełnia on jednocześnie rolę symetryzatora jednofazowego odbiornika dużej mocy, jakim jest najczęściej reaktor plazmowy z wyładowaniami barierowymi [28].



Rys. 4. 1. Schemat blokowy układów zasilania reaktorów plazmowych z wyładowaniami barierowymi lub koronowymi przy zasilaniu napięciem o częstotliwości sieciowej lub podwyższonej

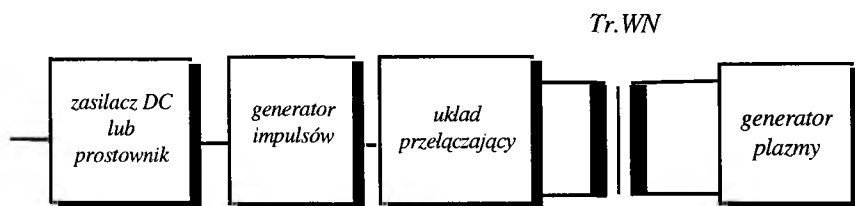
Podstawowe elementy układu zasilania z przekształtnikiem tyrystorowym przedstawia schemat blokowy z rysunku 4.2. Układ taki, obok transformatora podwyższającego napięcie i przekształtnika tyrystorowego, zawiera zwykle układ prostowniczy oraz dławiki: liniowy dla zapewnienia poprawnej współpracy z siecią zasilającą i pośredniczący w obwodzie prądu stałego.



Rys. 4. 2. Schemat blokowy układu zasilania reaktorów plazmowych podwyższonej częstotliwości z przekształtnikiem tyrystorowym

W pewnych zastosowaniach, do zasilania reaktorów plazmowych z wyładowaniami barierowymi, wykorzystywane są układy z energią impulsową. Zastosowanie krótkotrwałych, rzędu nanosekund, mikrowyładowań ułatwia uzyskanie plazmy nierównowagowej, w której średnie energie

elektronów i ich koncentracja są znacznie wyższe w porównaniu z innymi rodzajami wyładowań. Mikrowyładowania przyczyniają się do poprawy sprawności energetycznej procesu wytwarzania plazmy. Podczas bardzo krótkiego okresu trwania każdego mikrowyładowania elektrony zdążą nabyć odpowiedniej energii i wygenerować aktywne cząsteczki niezbędne w procesie oczyszczania bez znacznego podnoszenia temperatury gazu [21]. Mikrowyładowania tego typu można uzyskać stosując bardzo krótkie, odpowiednio ukształtowane, impulsy wysokonapięciowe. Schemat blokowy przykładowego rozwiązania impulsowego układu zasilania przedstawia rysunek 4.3.



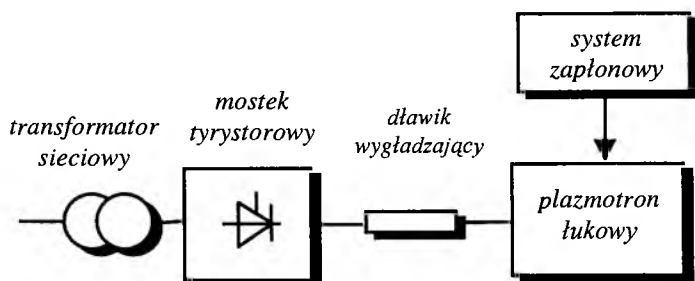
Rys. 4.3. Schemat blokowy impulsowego układu zasilania reaktorów plazmowych

Impulsowe układy zasilania są wciąż rzadko stosowane w instalacjach przemysłowych, głównie z uwagi na wysokie koszty generatorów impulsowych i elementów układu przełączającego, które muszą być budowane na duże wartości prądów i napięć. Specjalnej konstrukcji wymaga również dużej mocy transformator impulsowy.

Do obróbki gazów można także wykorzystywać plazmę wytwarzaną w reaktorach z łukiem elektrycznym, zarówno przy zasilaniu napięciem stałym jak i przemiennym i przy wymuszonym przepływie gazu. Szybki

przepływ gazu, przy ciśnieniu atmosferycznym lub podwyższonym, nie dopuszcza do znacznego wzrostu temperatury gazu, nawet przy stacjonarnym wyładowaniu.

Schemat blokowy układu zasilania reaktora plazmowego z wyładowaniem łukowym stabilizowanym szybko przepływającym gazem przedstawia rysunek 4.4 [48].



Rys. 4.4. Schemat blokowy układu zasilania plazmotronu łukowego przy wymuszeniu stałym z mostkiem tyrystorowym po stronie wtórnej transformatora

Układ z rys. 4.4 zawiera mostek tyrystorowy po wtórnej stronie transformatora sieciowego, zaś układ z rysunku 4.5 ma po stronie pierwotnej transformatora sieciowego sterownik tyrystorowo-magnetyczny. Oba układy wyposażone są w dodatkowy system zapłonu wyładowań w reaktorze.

Schematy blokowe układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się łukiem elektrycznym przedstawiono na rysunku 4.6 [19].

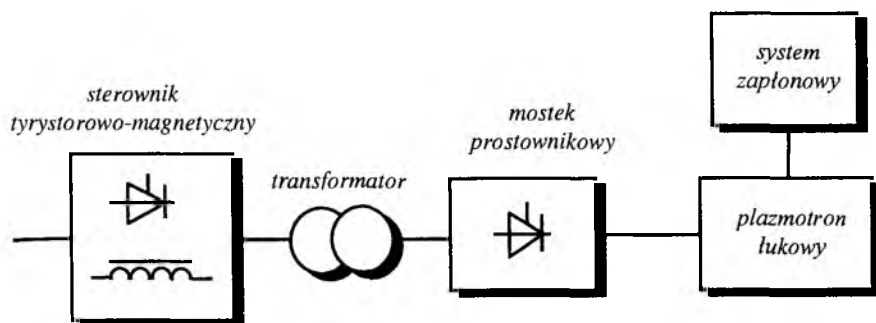
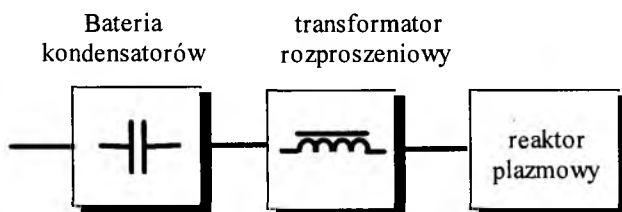


Fig. 4.5. Schemat blokowy układu zasilania plazmotronu łukowego ze sterownikiem tyrystorowo – magnetycznym [49]

a)



b)

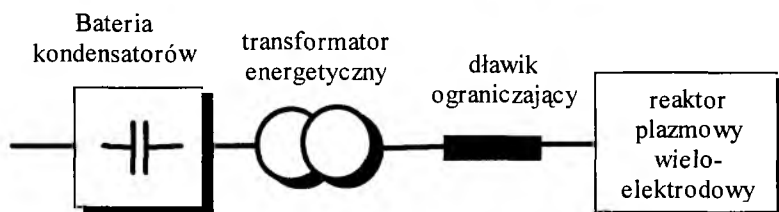


Fig. 4.6. Schematy blokowe układów zasilania reaktorów plazmowych typu GlidArc,

a) dla reaktora z jednym układem elektrod, b) dla reaktorów wieloelektrodowych.

Głównym elementem układu zasilania z rys. 4.6 a jest transformator rozproseniowy. Układ może być stosowany jest do zasilania reaktorów dwu- lub trzelektrodowych. Duża reaktancja transformatora rozprosze-

niowego jest w instalacjach przemysłowych kompensowana baterią kondensatorów.

Do zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym o wielu parach elektrod stosowany jest układ z rys. 4.6 b. W takim układzie, szeregowo z każdą parą elektrod, włączany jest dławik ograniczający prąd elektrod.

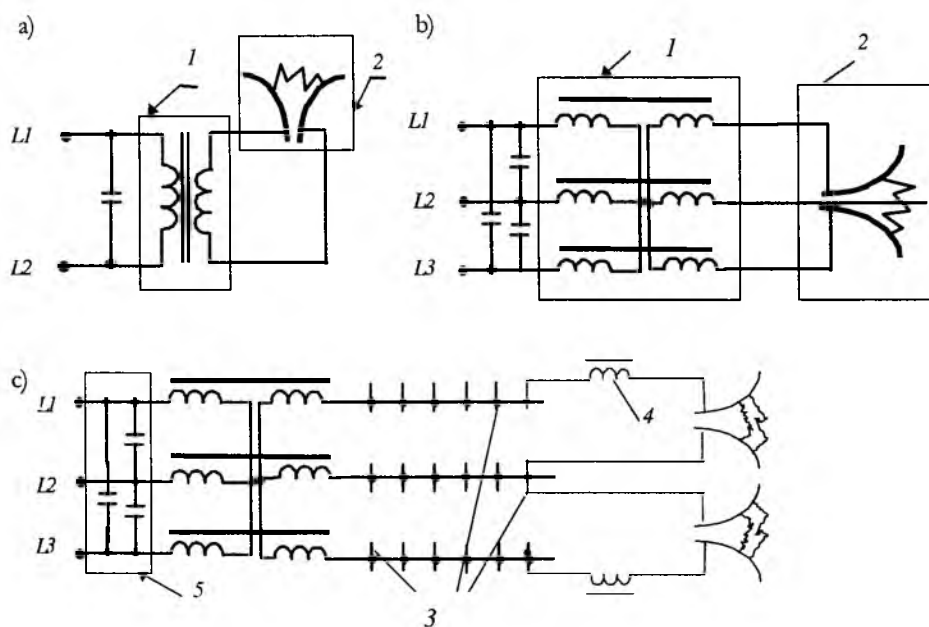
W układach przedstawionych na rysunku 4.6. napięcie wyjściowe transformatora w stanie jałowym powinno, w zależności od odstępów elektrod, zawierać się w granicach od 7-10kV, ale po zapłonie napięcie pracy powinno zmaleć do 1-2kV, i takie warunki pracy można w transformatorze zapewnić przez zwiększenie jego reaktancji wewnętrznej, stosując separację jego uzwojeń pierwotnych od wtórnych, bocznikowanie magnetyczne, bądź inne znane rozwiązania.

Przykładowe rozwiązania układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, o schematach blokowych z rys. 4.6, przedstawione są na rysunku 4.7.

Moc w układach z transformatorami rozproszeniowymi (rys.4.6a) i w układach z szeregowo włączanymi dławikami (rys. 4.6b) jest przekazywana do reaktora plazmowego przy napięciu znacznie niższym niż napięcie na jakie skonstruowano uzwojenia wtórne. Z tego powodu wykorzystanie mocy typowej transformatora nie jest wysokie i nie przekracza 10-20 % mocy na jaką zbudowano transformator.

Aby uzyskać duże wydajności procesu stosuje się od kilku do kilkunastu par elektrod i wielofazowe systemy elektrod, a moce takich układów mogą sięgać setek kilowatów. Bezpośrednie włączenie takiego reaktora na

zaczyski wtórne transformatora spowoduje spadek napięcia uniemożliwiający jednoczesny zapłon wszystkich elektrod. Do zasilania układów wieloelektrodowych stosuje się transformatory o sztywnej charakterystyce zewnętrznej i napięciu wtórnym równym napięciu zapłonu wyładowań, a prąd w takich układach jest ograniczany dławikami włączanymi szeregowo z każdą parą elektrod.



Rys. 4.7. Układy zasilania reaktorów plazmowych z transformatorami o powiększonej reaktancji wewnętrznej: a- układ dwuelektrodowy, b- układ trójelektrodowy, c-układ wieloelektrodowy z dławikami ograniczającymi prąd włączonymi w szereg z każdą parą elektrod; 1-transformator, 2-reaktor plazmowy, 3-elektrody, 4-dławik, 5-bateria kondensatorów

Moc dławików należy tak dobrać, aby napięcie na ich zaciskach stanowiło (0.8-0.9) napięcia wyjściowego transformatora przy nominalnym natężeniu

niu prądu elektrod. W takim układzie transformator jest w (80-90)% obciążony dławikami, a jego moc bierna musi być kompensowana baterią kondensatorów.

Układ z transformatorem trójfazowym do zasilania reaktora zawierającego 18 par elektrod, po sześć par włączonych na każde z trzech napięć przewodowych, przedstawia rysunek 4.7.c (na rysunku, z uwagi na jego czytelność, pokazano tylko dwie z 18 par elektrod) [18].

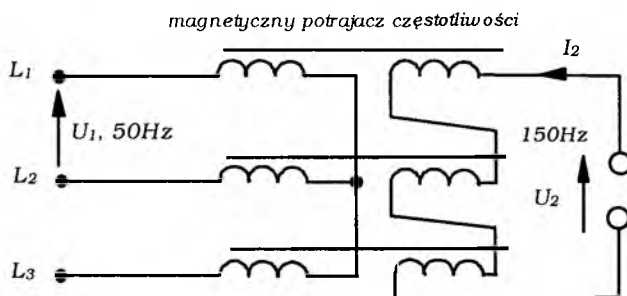
Kolejną grupą układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym są układy z magnetycznymi statycznymi mnożnikami częstotliwości. Magnetyczne mnożniki częstotliwości znajdują tu zastosowanie głównie z uwagi na bardzo podatną charakterystykę zewnętrzną $U_2=f(I_2)$ (rys. 4.8b), a jej kształt zbliżony do charakterystyki łuku elektrycznego sprawia, że prąd elektrod jest ograniczany w naturalny sposób.

Na rysunku 4.8 przedstawiony jest układ z magnetycznym potrójnikiem częstotliwości oraz jego charakterystyki. Napięcie na wyjściu potrójnika maleje od wartości napięcia stanu jałowego U_o do dowolnie wybranej wartości w warunkach obciążenia. W związku z tym reaktor plazmowy pracuje stabilnie bez konieczności stosowania dodatkowych dławików ograniczających prąd [19],[34].

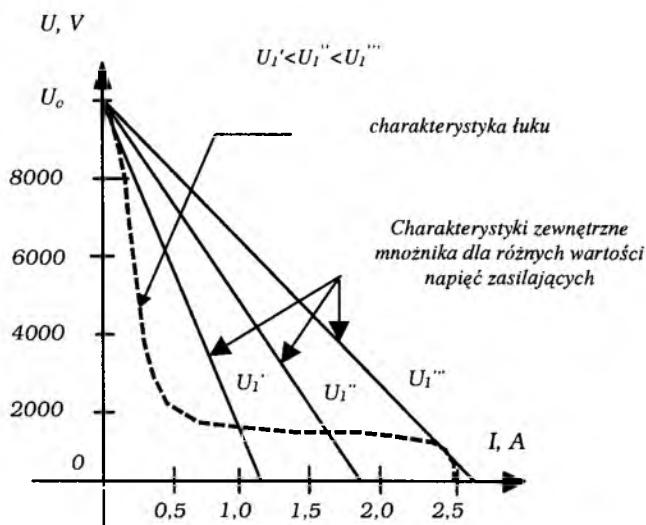
Magnetyczne mnożniki częstotliwości mogą być także budowane z wyjściem trójfazowym. Dla reaktorów plazmowych o większej liczbie par elektrod, możliwe jest budowanie magnetycznych mnożników częstotliwości z kilkoma uzwojeniami wtórnymi, każde zasilające oddzielną parę elektrod. Powiększanie liczby uzwojeń wtórnych jest w mnożnikach ma-

gnetycznych bardziej korzystne niż w transformatorach, bowiem uzwojenia wtórne tych pierwszych są budowane na mniejszą moc niż uzwojenia pierwotne.

a)



b)



Rys. 4. 8. Schemat połączeń (a) i charakterystyki (b) układu zasilania reaktora plazmowego z magnetycznym potrajaczem częstotliwości

Na koniec przeglądu układów zasilania reaktorów plazmowych przedstawimy ideę pracy układu zintegrowanego, którego analiza jest głównym celem niniejszej rozprawy. Integracja układu dotyczy jego funk-

cji- zapłon wyładowania, jego podtrzymanie po zapłonie oraz ograniczenie prądu realizowane są w jednym urządzeniu.

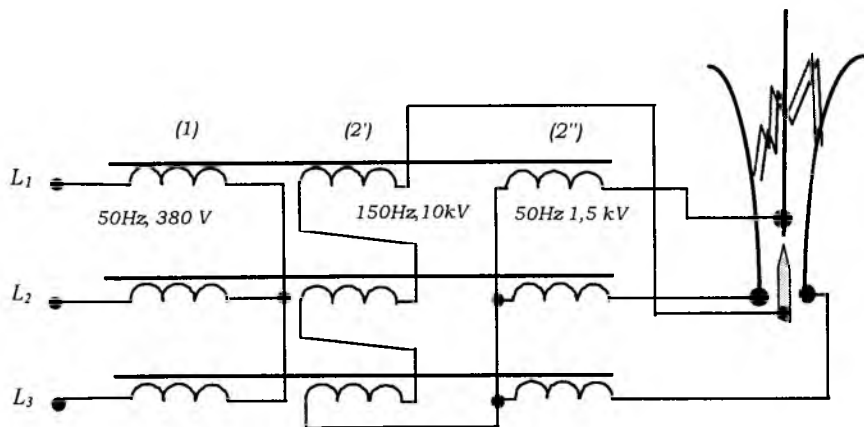
Idea pracy układu polega na wykorzystaniu do zapłonu wyładowania napięcia indukowanego przez wyższe harmoniczne strumienia magnetycznego generowane w naturalny sposób w rdzeniach transformatorów. Po zapłonie wyładowanie podtrzymywane jest napięciem indukowanym przez podstawową harmoniczną strumienia magnetycznego.

Schemat układu przedstawiono na rysunku 4.9. Na tym samym rdzeniu magnetycznym i obok wspólnych uzwojeń pierwotnych (1) umieszczone są dwa uzwojenia wtórne zasilacza. Jedno z uzwojeń (2'') połączone jest podobnie jak uzwojenia pierwotne w gwiazdę i przeznaczone jest do pracy po zapłonie, a drugie -połączone w otwarty trójkąt (2') - przeznaczone do zapłonu wyładowania. Uzwojenie (2''), połączone w gwiazdę, zbudowane jest na wartości prądu i napięcia, przy których reaktor plazmowy pracuje po zapłonie, gdy zachodzą w nim wyładowania łukowe. Natomiast uzwojenie (2') połączone w trójkąt przeznaczone jest do zainicjowania łuku między elektrodami i musi być zaprojektowane na napięcie zapłonu wyładowań.

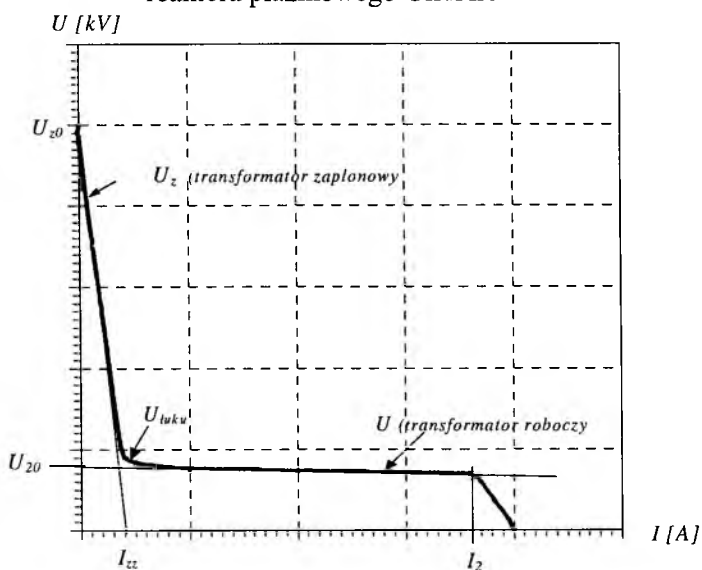
Na rysunku 4.10 przedstawiono charakterystyki zewnętrzne układu zapłonowego i transformatora podtrzymującego wyładowania oraz charakterystykę łuku, objaśniające zasadę działania układu zasilania.

Zaletą układu zintegrowanego jest naturalna współpraca układu zapłonowego i roboczego, symetryczne obciążenie sieci trójfazowej oraz możliwość tworzenia układów wieloelektrodowych. Układ zintegrowany

został opracowany przy udziale autorki [30], [32], [81. Szczegółowo układ ten przedstawiony jest w rozdziale 5.



Rys. 4. 9. Schemat ideowy zintegrowanego układu zasilania reaktora plazmowego GlidArc



Rys. 4. 10. Charakterystyki zewnętrzne transformatora roboczego, zapłonowego i wyładowania łukowego

4.2. Analiza mocy i sprawności układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

Zjawiska i analiza mocy w elementach wyładowczych reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym zostały omówione w rozdziale 2, tu natomiast przedstawiono analizę mocy w układzie zasilania między zaciskami sieci a zaciskami elektrod reaktora plazmowego.

Reaktor plazmowy ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym jest dla układu zasilania specyficznym odbiornikiem nieliniowym, w których obok mocy czynnej związanej z zachodzącymi reakcjami chemicznymi i stratami występuje moc bierna odkształcenia D , a jego współczynnik mocy określony jako stosunek mocy czynnej P do iloczynu UI na zaciskach elektrod jest w granicach 0,6-0,8 [80]. Moc pozorna reaktora plazmowego jest zatem równa $S_{el}=(1,2-1,6)$ mocy czynnej P wymaganej w procesie neutralizacji toksycznych gazów. W reaktorach bez układu zapłonowego (rys. 4.7 i 4.8) moc pozorna S na jaką musi być zbudowany układ zasilania jest znacznie wyższa i wynosi $S_T=(5-8)S_{el}$ a moc dławików ograniczających prąd Q_L i kondensatorów kompensujących moc bierną tych dławików Q_C równa jest około 0,8 mocy transformatora ($Q_L=Q_C\approx 0,8S_T\approx 7S_{el}$). W układzie zintegrowanym moc transformatora S_T jest równa mocy S_{el} , tj. $S_T=(1,2-1,6)P$.

Kilkukrotne zmniejszenie mocy transformatora roboczego oraz eliminacja dławików i kondensatorów upraszcza układ, obniża jego cenę i poprawia sprawność energetyczną. Porównanie strat mocy przeprowadzono posługując się schematami blokowymi przedstawionymi na rysunku

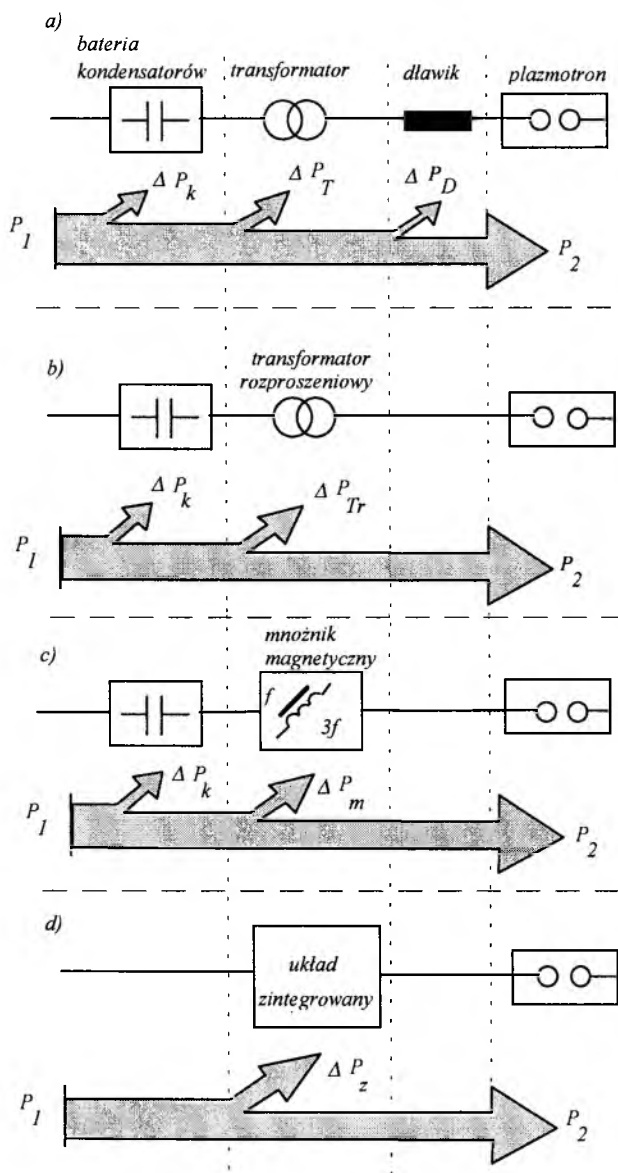
4.12 na przykładzie reaktora plazmowego o mocy 50 kW oraz na podstawie danych katalogowych kondensatorów, dławików i transformatorów. Wyniki analizy strat mocy w elementach układów zasilania reaktorów plazmowych typu GlidArc przedstawiono w Tablicy 4.1.

Tablica 4.1. Straty mocy w układach zasilania plazmotronów łukowych

Układ	Układ z transformatorem i dławikami rys. 4.12a			Układ z transformatorem rozproszonym rys.4.12b			Układ z m.m.cz rys. 4.12c			Układ zintegrowany rys. 4.12d		
Element	S_n	ΔP	ΔP	S_n	ΔP	ΔP	S_n	ΔP	ΔP	S_n	ΔP	ΔP
Układu	kVA	kW	%	kVA	kW	%	kVA	kW	%	kVA	kW	%
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			68,4			66			54,8		
Sprawność $\frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \%$	60,5			73			76			91		

* Procentowe straty mocy ΔP wyznaczano odnosząc je do mocy wtórnej P_2

Układ z rys. 4.12a, aby przekazać do reaktora moc czynną $P=50\text{kW}$, pobiera z sieci moc czynną równą 82,6kW, a poszczególne elementy układu muszą być zaprojektowane i zbudowane na moc pozorną równą 400kVA. Sprawność omawianego układu wynosi około 60%. Wyższą sprawność przekraczającą 70% mają dwa następne układy- z transformatorem rozproszonym (rys.4.12b) i z magnetycznym mnożnikiem częstotliwości (rys. 4.12c), głównie dzięki eliminacji dławików niezbędnych w układzie z rys. 4.12a oraz przez zmniejszenie mocy transformatorów.



Rys. 4.12. Schematy blokowe układów zasilania plazmotronów łukowych Gli-dArc:
a- układ zasilania z transformatorem,
b- układ z transformatorem rozproszeniowym,
c- układ z magnetycznym mnożnikiem częstotliwości
d- układ zintegrowany.

Sprawność energetyczna układu zintegrowanego jest najwyższa i przekracza 90% (rys. 4.12d). Zmniejszenie strat mocy w tym przypadku uzyskuje się nie tylko przez eliminację dławików ograniczających prąd i kondensatorów kompensujących, ale przede wszystkim przez kilkukrotne zmniejszenie mocy transformatora - w prezentowanym przykładzie pięciokrotne w stosunku do układu z rys. 4.12a.

Jak wynika z Tablicy 4.1 realizacja w jednym urządzeniu zasilającym funkcji zapłonu i podtrzymania wyładowań zwiększa sprawność i niezawodność reaktorów plazmowych typu GlidArc oraz obniża ich koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

5. Zintegrowany układ zasilania reaktorów plazmowych GlidArc

5.1. Zasada działania

Ideę zintegrowanego układu zasilania reaktora plazmowego GlidArc przedstawiono w rozdziale 4.1, charakteryzując układy zasilania reaktorów o ślizgającym się wyładowaniu łukowym. Schemat z rys. 4.9 dobrze prezentuje zasadę działania takich układów zasilania, jednak w realizacji praktycznej lepszym okazał się układ z rys. 5.1. Układ zintegrowany stanowią cztery jednofazowe transformatory odpowiednio połączone ze sobą i przyłączone do trójfazowej sieci czteroprzewodowej. Trzy jednakowe transformatory, dostarczające energię do reaktora (transformatory robocze) połączone są w układ trójfazowy gwiazda – gwiazda, przy czym uzwojenia pierwotne dołączone są do sieci zasilającej a uzwojenia wtórne do elektrod roboczych reaktora plazmowego. Transformator zapłonowy włączony jest na napięcie występujące między punktem neutralnym sieci zasilającej N i punktem gwiazdy uzwojeń pierwotnych transformatorów roboczych N_1 , a jego uzwojenie wtórne przyłączone jest do punktu neutralnego gwiazdy uzwojeń wtórnych transformatorów roboczych N_2 i elektrody zapłonowej I (rys. 5.3). Przy zasilaniu uzwojeń pierwotnych transformatorów roboczych trójfazowym napięciem sinusoidalnym nieli-

niowe charakterystyki magnesowania rdzeni powodują, że prąd magnesujący jest odkształcony [27]:

$$i_{\mu}(t) = I_{1m} \sin \omega t - I_{5m} \sin 5\omega t + I_{7m} \sin 7\omega t + \dots \quad (5.1)$$

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

$$\Phi_t = \Phi_1 \sin \omega t + \Phi_3 \sin 3\omega t + \Phi_9 \sin 9\omega t + \dots \quad (5.2)$$

W transformatorach jednofazowych wyższe harmoniczne strumienia magnetycznego mają swobodne drogi powrotne i dzięki temu osiągają znaczne wartości. W rdzeniach z blachy zimnowalcowanej przy indukcji około 2T harmoniczna trzecia wynosi około 20% ($B_3 \approx 0,2B_1$) a harmoniczna dziewiąta około 1% ($B_9 \approx 0,01B_1$) [29]. W indukowanym przez odkształcony strumień Φ_t napięciu fazowym u_f możemy więc uwzględnić tylko pierwszą i trzecią harmoniczną,

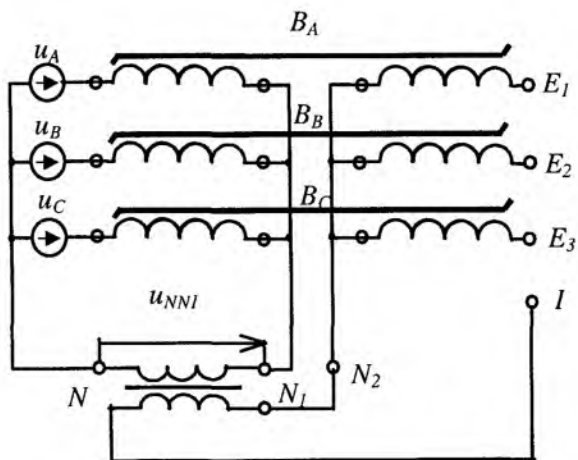
$$u_f = U_{1m} \sin \omega t - U_{3m} \sin 3\omega t, \quad (5.3)$$

i wartość chwilową napięcia fazowego możemy zapisać równaniem:

$$u_f = u_1 - u_3. \quad (5.4)$$

Dla strony pierwotnej układu z rys. 5.1 możemy napisać:

$$\begin{aligned}
 u_{NN_1} &= u_A - u_{a1} + u_{a3}, \\
 u_{NN_1} &= u_B - u_{b1} + u_{b3}, \\
 u_{NN_1} &= u_C - u_{c1} + u_{c3}.
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$



Rys. 5.1. Schemat układu zintegrowanego

Po dodaniu równań (5.5) stronami oraz uwzględniając, że:

$$\begin{aligned}
 u_A + u_B + u_C &= 0, \\
 u_{a1} + u_{b1} + u_{c1} &= 0, \\
 u_{a3} &= u_{b3} = u_{c3} = u_3,
 \end{aligned}$$

otrzymamy:

$$u_{NN_1} = u_3, \tag{5.6}$$

$$u_{NN_1} = U_{3m} \sin 3\omega t. \tag{5.7}$$

Wartość skuteczna napięcia pomiędzy punktami neutralnymi układu wynosi:

$$U_{NN_1} = 3\sqrt{2}\pi f N_1 A_{Fe} B_3, \quad (5.8)$$

gdzie:

- f – częstotliwość sieci zasilającej,
- N_1 – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego transformatora,
- A_{Fe} – pole przekroju rdzenia,
- B_3 – indukcja trzeciej harmonicznej.

Wartość trzeciej harmonicznej indukcji magnetycznej określona jest stanem nasycenia oraz kształtem charakterystyki magnesowania $B=f(H)$ magnetowodu transformatora roboczego. Stopień nasycenia odnosi się do amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji B_1 określonej wartością napięcia zasilającego. Wartość indukcji trzeciej harmonicznej możemy wyznaczyć analitycznie odpowiednio aproksymując krzywą magnesowania.

Na podstawie schematu z rys. 5.1 dla stanu jałowego (przy nie włączonym transformatorze zapłonowym) możemy napisać:

$$i_{\mu A} + i_{\mu B} + i_{\mu C} = 0. \quad (5.9)$$

Te prądy magnesujące wymuszają odpowiednie wartości indukcji w rdzeniu:

$$\begin{aligned} B_{tA} &= B_1 \cos \omega t - B_3 \cos 3\omega t, \\ B_{tB} &= B_1 \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) - B_3 \cos 3\omega t, \\ B_{tC} &= B_1 \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) - B_3 \cos 3\omega t, \end{aligned} \quad (5.10)$$

gdzie: B_1 , B_3 są amplitudami pierwszej i trzeciej harmonicznej indukcji.

Dla czasu $t=0$ mamy:

$$\begin{aligned} B_{0A} &= B_1 - B_3, \\ B_{0B} &= -\frac{1}{2} B_1 - B_3, \\ B_{0C} &= -\frac{1}{2} B_1 - B_3. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Uwzględniając, że $i_\mu = f(B_1)$, dla czasu $t=0$ równanie (5.9) możemy zapisać:

$$f(B_1 - B_3) + 2f(-\frac{1}{2} B_1 - B_3) = 0 \quad (5.12)$$

Wyznaczając z powyższego równania indukcję B_3 jako funkcję harmonicznej podstawowej indukcji B_1 otrzymamy $B_3 = f(B_1)$.

Równanie (5.12) możemy rozwiązać graficznie lub analitycznie, aproksymując odpowiednio charakterystykę magnetowodu transformatora. Dla rdzeni pracujących przy indukcji bliskiej nasycenia dobre wyniki daje aproksymacja funkcją sinus hiperboliczny [27]. Korzystając z takiej aproksymacji krzywą magnesowania można zapisać jako:

$$H = k_1 \sinh(k_2 B_1), \quad (5.13)$$

gdzie: k_1 , k_2 – stałe wyznaczone z charakterystyk magnetowodu transformatora.

Charakterystyka magnesowania blachy elektrotechnicznej podawana przez wytwórcę w katalogu różni się od rzeczywistej krzywej magnesowania

wania magnetowodu transformatora. Przy projektowaniu należy uwzględnić szczeliny powietrzne i odpowiednio skorygować charakterystykę katalogową, aby można było korzystać z zależności (5.12) i (5.13). Natomiast przy badaniach laboratoryjnych zbudowanych modeli układów zintegrowanych wygodniej jest posłużyć się charakterystyką magnesowania magnetowodów wyznaczoną pomiarowo i wtedy lepiej przedstawić ją jako:

$$I\mu = f(B) = k_1 \sinh k_2 B_1. \quad (5.14)$$

Stałe k_1 i k_2 wyznaczamy dla wybranych wartości z krzywej magnesowania magnetowodu. Punkty należy obrać przed „kolanem” krzywej magnesowania i w obszarze znacznego nasycenia [27]. Podstawiając wartości I_μ i B dla punktów p i q (rys. 5.2) do równania (5.14) mamy:

$$\begin{aligned} I_{\mu p} &= k_1 \sinh k_2 B_p, \\ I_{\mu q} &= k_1 \sinh k_2 B_q. \end{aligned} \quad (5.15)$$

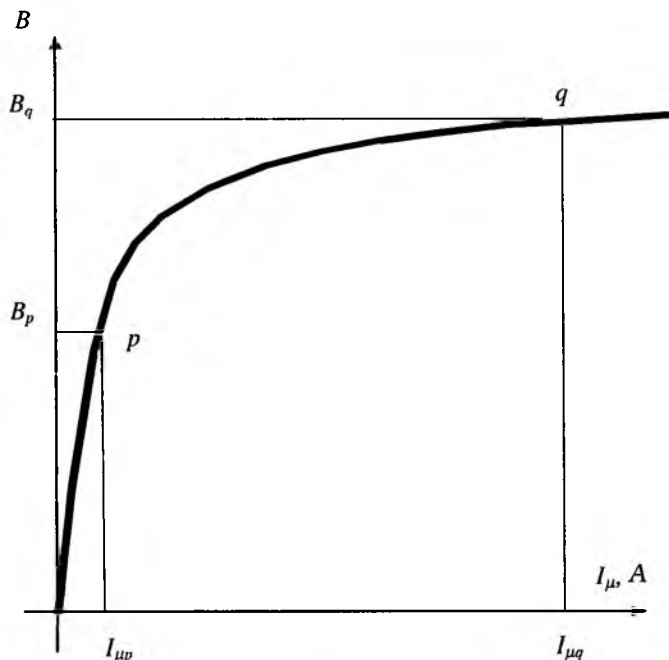
Zapisując funkcję sinus hiperboliczny w formie wykładniczej, otrzymamy:

$$\begin{aligned} I_{\mu p} &= \frac{1}{2} k_1 (e^{k_2 B_p} - e^{-k_2 B_p}), \\ I_{\mu q} &= \frac{1}{2} k_1 (e^{k_2 B_q} - e^{-k_2 B_q}). \end{aligned} \quad (5.16)$$

Rozwiązując równanie (5.16) względem k_1 i k_2 przy pominięciu bardzo małych wartości wyrażeń $e^{-k_2 B_p}$ oraz $e^{-k_2 B_q}$ mamy:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{I_{\mu q}}{\sinh k_2 B_q}, \\
 k_2 &= \frac{\ln \frac{I_{\mu q}}{I_{\mu p}}}{B_q - B_p},
 \end{aligned}
 \tag{5.17}$$

przy czym, stałe te mają wymiary, odpowiednio A i $1/T$.



Rys. 5.2. Wyznaczanie stałych k_1 i k_2 z charakterystyki magnesowania

Korzystając z tak wyznaczonych stałych k_1 i k_2 indukację trzeciej harmonicznej B_3 w magnetowodach transformatorów roboczych możemy wyrazić równaniem:

$$B_3 = \frac{1}{k_2} \operatorname{arc\,tanh} \frac{\sinh(k_2 B_1 - 2 \sinh \frac{k_2 B_1}{2})}{\cosh(k_2 B + 2 \cosh \frac{k_2 B_1}{2})}. \quad (5.18)$$

Analizując postać wykładniczą funkcji hiperbolicznych powyższego równania, przy indukcjach w magnetowodach przekraczających 2 T, można pewne człony pominąć i wyrazić trzecią harmoniczną indukcji zależnością uproszczoną w postaci:

$$B_3 = \frac{1}{4} B_1 - \frac{1}{2} \frac{\ln 2}{k_2}, \quad (5.19)$$

która daje wynik wystarczająco dokładny dla projektowania takich układów. W zakresie indukcji (0,5-2,2) T wyniki uzyskane z zależności (5.18) i (5.19) praktycznie nie różnią się. Mając wartość B_3 i wymiary rdzenia możemy z zależności (5.8) obliczyć napięcie potrojonej częstotliwości występujące między punktami neutralnymi sieci i gwiazdy uzwojeń pierwotnych transformatorów roboczych. Uwzględniając związki pomiędzy napięciem sieci zasilającej U_1 a indukcją w rdzeniu B_1 przy zadanych wymiarach magnetowodu i charakterystyce magnesowania możemy napięcie U_{NNI} wyznaczyć z równania:

$$U_{NNI} = U_1 \frac{\cosh(\frac{\sqrt{3}}{2} k_2 B_1) - 1}{2 \cosh(\frac{\sqrt{3}}{2} k_2 B_1) + 1}. \quad (5.20)$$

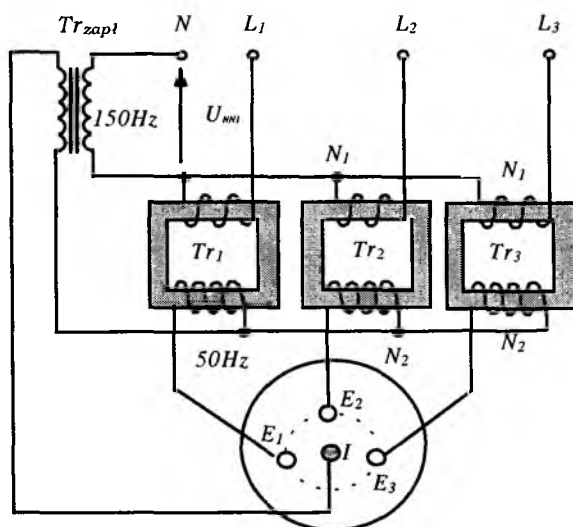
W układzie zintegrowanym wysoka dokładność obliczenia wartości napięcia U_{NNI} nie jest konieczna, ponieważ dla wartości napięć zapłonu można dopuścić dosyć szeroki przedział wartości ($\pm 10\%$) i wartość trzeciej harmonicznej indukcji można określić szacunkowo. Dla indukcji B_I stosowanych w transformatorach z przedziału $(1,5 \div 2)$ T, wartość trzeciej harmonicznej indukcji stanowi około 20% pierwszej harmonicznej ($B_3 \approx 0,2B_I$). Napięcie pomiędzy punktami neutralnymi wyniesie więc około 50% napięcia fazowego strony pierwotnej transformatorów:

$$U_{NNI} = (0,5 \div 0,6) U_{1f}. \quad (5.21)$$

Jeżeli do zacisków NN_I przyłączymy jednofazowy transformator o odpowiedniej przekładni, to na jego zaciskach wyjściowych otrzymamy napięcie potrojonej częstotliwości o wymaganej dla zapłonu wartości. Charakterystyka zewnętrzna $U_2 = f(I_2)$ tak włączonego transformatora będzie tak samo podatna jak magnetycznego potrajacza częstotliwości i może być on wykorzystany do zapłonu reaktorów plazmowych [79]. Napięcie zapłonu jest 5-10 razy wyższe od napięcia pracy reaktora plazmowego i umieszczenie uzwojeń roboczych i zapłonowych na jednym rdzeniu, jak na rys.4.9, stwarza problemy izolacyjne [31]. W takim rozwiązaniu napięcie zapłonowe indukowane jest przez odkształcony strumień Φ_t , zawierający również pierwszą harmoniczną Φ_I . Napięcie indukowane w uzwojeniach każdego transformatora ma wartość kilka razy większą od napięcia zapłonowego. Wymaga to odpowiedniej izolacji, zwiększa koszty i obniża niezawodność. Układ z wydzielonym transformatorem zapłonowym pozwala w pełni wykorzystać moc transformatorów roboczych, a jednocześnie

uniknąć problemów izolacyjnych. Schemat połączeń transformatorów tworzących układ zasilania według powyższej koncepcji [32] przedstawia rysunek 5.3, zaś jego działanie ilustrują rysunki 5.4 - 5.7.

W stanie jałowym układu zasilania, tj. gdy między elektrodami reaktora plazmowego łuk nie płonie, amplituda napięcia transformatora jednofazowego 150Hz w kolejnych półokresach napięcia zasilającego sumuje się z amplitudą napięcia każdej fazy trójfazowego transformatora roboczego 50Hz. Stan jałowy układu odwzorowuje schemat zastępczy na rys. 5.4.a.



Rys.5.3. Schemat połączeń układu zintegrowanego; Tr_{zapl} – transformator zapłonowy, I – elektroda zapłonowa, $Tr1$, $Tr2$, $Tr3$ – jednofazowe transformatory robocze, $E1$, $E2$, $E3$ –elektrody robocze

Prąd transformatora zapłonowego nie przekracza 1% prądu roboczego elektrod i w analizie mocy, w czasie cyklu pracy reaktora, gałąź zapłonowa może być pominięta, a schemat zastępczy uprości się do po-

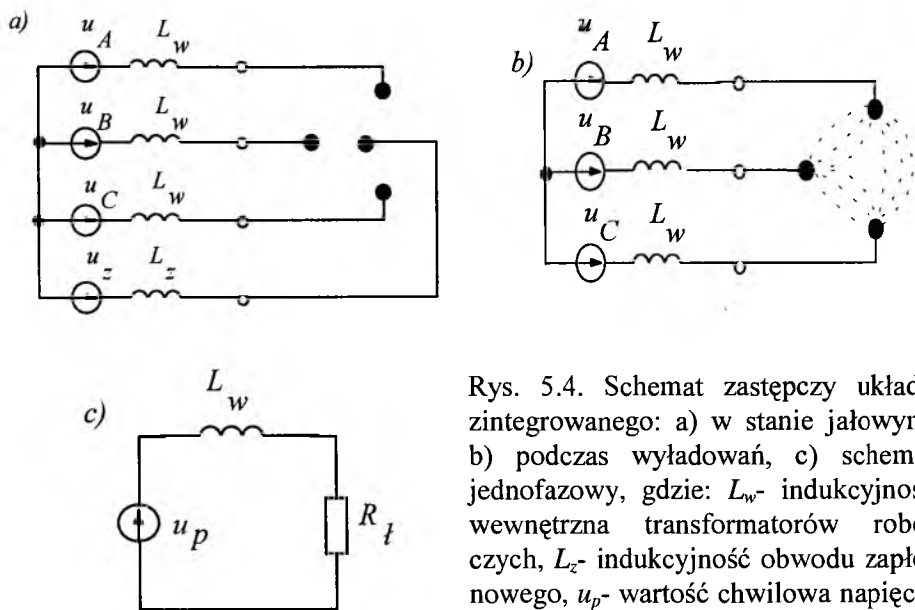
stacji b) z rys. 5.4, bądź, z uwagi na symetrię do schematu jednofazowego (Rys. 5.4c). Wartości chwilowe napięć fazowych można zapisać następująco:

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t + U_{zm} \sin 3\omega t, \\ u_B &= U_m \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + U_{zm} \sin 3\omega t, \\ u_C &= U_m \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) + U_{zm} \sin 3\omega t, \end{aligned} \quad (5.22)$$

gdzie:

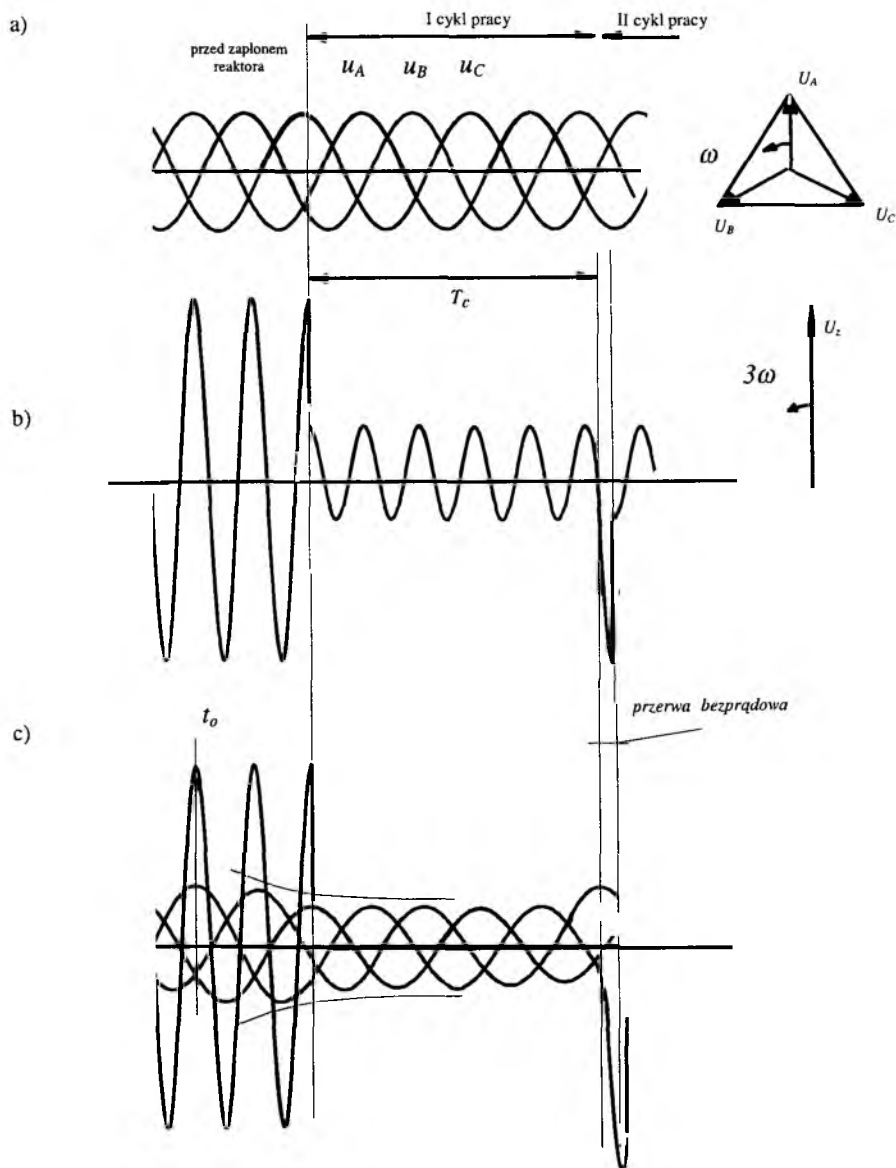
U_m – amplituda napięcia wtórnego fazowego transformatorów roboczych,

U_{zm} – amplituda napięcia wtórnego transformatora zapłonowego.



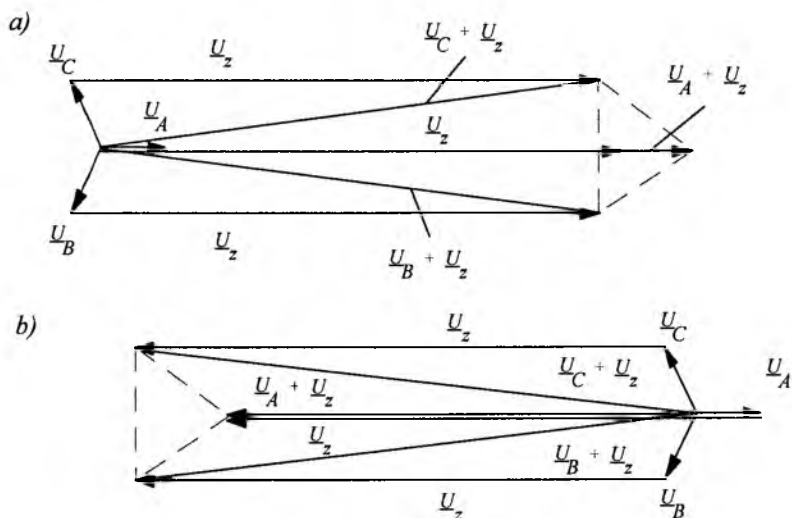
Rys. 5.4. Schemat zastępczy układu zintegrowanego: a) w stanie jałowym, b) podczas wyładowań, c) schemat jednofazowy, gdzie: L_w - indukcyjność wewnętrzna transformatorów roboczych, L_z - indukcyjność obwodu zapłonowego, u_p - wartość chwilowa napięcia przewodowego, R_t - rezystancja zastępcza łuku

Chwilowe przebiegi napięć transformatorów roboczych i transformatora zapłonowego w stanie jałowym i podczas pierwszego cyklu pracy reaktora przedstawiono na rysunku 5.5.

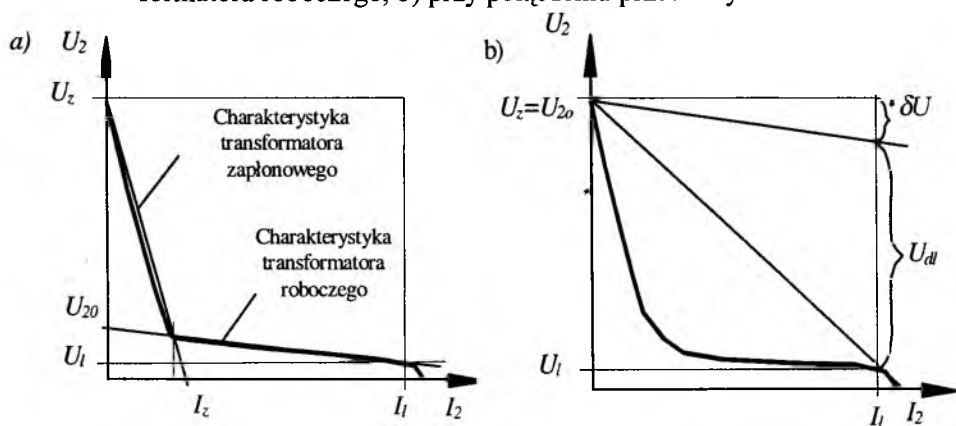


Rys. 5.5. Przebiegi chwilowych wartości napięć w układzie zintegrowanym, a) napięcia na elektrodach roboczych (50Hz), b) napięcie transformatora zapłonowego 150Hz, c) największa wartość napięcia między elektrodą roboczą i zapłonową, (na rysunku, z uwagi na jego przejrzystość, nie dotrzymano proporcji między napięciem zapłonu a napięciem pracy)

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 ostatniej chwili ostatniego 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, łuk 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 50Hz, tj. około 1,7ms. Czas cyklu pracy zależy od wymiarów i kształtu elektrod oraz prędkości przepływu gazu i trwa od kilku do kilkunastu okresów. 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 wektorowe dla pierwszej harmonicznej napięcia roboczego (50Hz) i pierwszej harmonicznej napięcia zapłonu 150Hz w stanie jałowym dla czasu $t=t_0$ (rys.5.5c) i w czasie przerw bezprądowych przedstawia rysunek 5.6. Połączenie uzwojeń, któremu odpowiada wykres z rysunku 5.6a daje wyższe napięcie zapłonu i takie powinno być realizowane w praktyce. Przykładową charakterystykę prądowo-napięciową reaktora plazmowego zasilanego z układu zintegrowanego (napięcie pary elektrod w funkcji prądu elektrod $U=f(I)$) przedstawiono na rysunku 5.7a.



Rys. 5.6. Wykres wektorowy 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

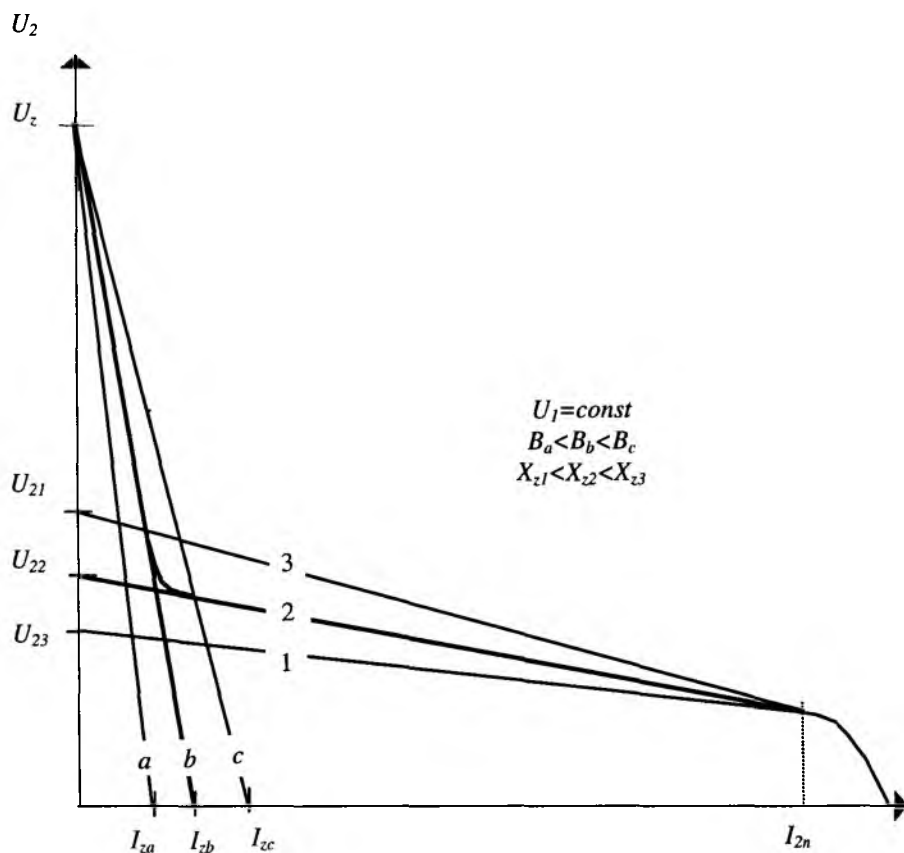


$$S_T \approx S_R$$

$$S_T = (5 \div 10) S_R$$

Rys. 5.7. Charakterystyka zewnętrzna reaktora plazmowego: a) zasilanego z układu zintegrowanego, b) z transformatora z dławikami; δU – strata napięcia w transformatorze, U_{dl} – napięcie na dławiku ograniczającym prąd elektrod

Dla porównania przedstawiono na tym samym rysunku charakterystykę zewnętrzną reaktora plazmowego zasilanego z transformatora (rys.5.7b). W bilansie mocy moc transformatora zapłonowego może być pomijana bowiem, niezależnie od mocy reaktora, wynosi ona około 200VA [19],[20].



Rys.5.8. 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 różnych wartości indukcji magnetycznej w rdzeniach transformatorów roboczych

Moc pozorna transformatora S_T w układzie z dławikami ograniczającymi prąd jest około 5÷10 razy większa od mocy reaktora plazmowego S_R , natomiast w układzie zintegrowanym moc transformatora roboczego jest w przybliżeniu równa mocy plazmotronu. 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. 5.8.

Przedstawione rozważania o działaniu i właściwościach układu zintegrowanego zweryfikowano w badaniach eksperymentalnych zbudowanych w tym celu modeli laboratoryjnych.

5.2. Modele układu

Do budowy modeli przyjęto założenia, które są pewnym kompromisem pomiędzy technicznymi możliwościami wykonania ich w warunkach laboratorium katedry i przeprowadzenia niezbędnych badań, poniesionymi kosztami oraz możliwością wykorzystania modelu w badaniach przemysłowych instalacji pilotujących.

Uwzględniając powyższe, przyjęto do budowy modeli zasilaczy następujące założenia:

- zasilanie z sieci trójfazowej 50Hz, 400V,

- układ elektrod trójfazowy, napięcie przewodowe w stanie jałowym 2kV, w stanie obciążenia 1kV, prąd obciążenia elektrod 2A, reaktancja wewnętrzna transformatorów powiększona, tak aby ograniczyć prąd zwarcia,
- transformator zapłonowy 150Hz, 110V/10kV, prąd elektrody zapłonowej 20mA,
- uzwojenie pierwotne wykonane z regulacją zaczepów 3 stopniową, z częściową kompensacją mocy biernej.

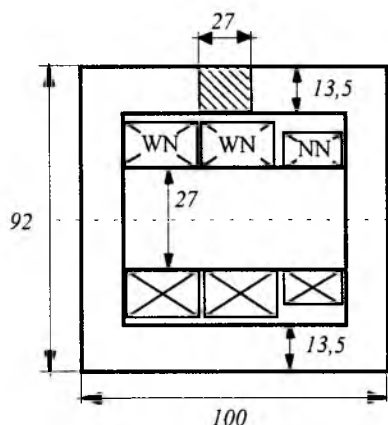
Do wykonania transformatorów roboczych wykorzystano rdzenie zwijane, przecinane typu RZC z taśmy transformatorowej o grubości 0,3mm, według BN 75/0642-28 z izolacją I-5, produkcji Zakładów Transformatorów Radiowych "ZATRA" w Skierniewicach. W modelu I zastosowano rdzeń RZC-50/140/35 a w modelu II RZC-51/154/50. Uzwojenia wykonano z drutu miedzianego emaliowanego o przekroju kołowym. Wymiary rdzeni oraz liczby zwojów i przekroje przewodów zawiera tablica 5.1. Uzwojenia pierwotne wykonano jako 3 zaczepowe w celu regulacji mocy oraz zapewnienia dobrej pracy zasilacza przy odchyleniach napięcia sieci od znamionowego. Aby uzyskać zwiększoną reaktancję zastosowano konstrukcje uzwojeń rozdzielonych, tj. uzwojenia pierwotne i wtórne umieszczone są na oddzielnych kolumnach. Zwiększona wskutek tego moc magnesująca kompensowana jest częściowo w modelu baterią kondensatorów włączonych na wejściu zasilacza (20 μ F, 500V).

Transformator zapłonowy wykonano stosując rdzeń płaszczy, uzwojenie pierwotne i wtórne nawinięte są w oddzielnych karkasach i umieszczone obok siebie.

Tablica 5.1. Dane transformatorów modeli zasilaczy

Dane transformatora roboczego 50Hz			
Uzwojenia		Model I	Model II
Liczba zwojów uzwojenia pierwotnego	-	400/420/440	214/226/242
Liczba zwojów uzwojenia wtórnego	-	2000	2250
Przekrój drutu uzwojenia pierwotnego	mm ²	3,1	7,7
Przekrój drutu uzwojenia wtórnego	mm ²	0,8	0,95
rdzeń			
Przekrój rdzenia	m ²	12·10 ⁻⁴	20·10 ⁻⁴
Długość obwodu magnetycznego	m	0,45	0,6
Wysokość kolumny	m	0,14	0,154
Grubość blachy transformatorowej	mm	0,30	0,30

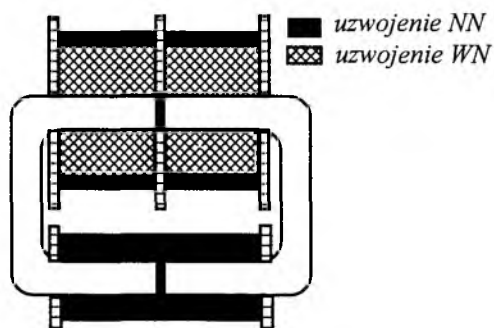
Takie rozwiązanie zapewnia dobre warunki izolacyjne, jednak powiększa reaktancje rozproszenia czyniąc charakterystykę zewnętrzną bardziej podatną i zmniejszając prąd elektrody zapłonowej. Konstrukcję rdzenia z wymiarami przedstawia rys. 5.8. Uzwojenia transformatora zapłonowego wykonano z przewodu miedzianego izolowanego emalią: uzwojenia pierwotne 360 zwojów z przewodu o średnicy 0,6mm, a uzwojenie wtórne z przewodu o średnicy 0,2mm, dwie cewki po 12300 zwojów. Uzwojenia zostały zalane masą kablową. W modelu II inne są tylko transformatory robocze, natomiast pozostałe elementy zasilacza i ich połączenie pozostały bez zmian. Celem budowy drugiego modelu było powiększenie mocy zasilacza, umożliwienie zasilania reaktora o sześciu elektrodach oraz zmniejszenie reaktancji wewnętrznej transformatorów roboczych.



Rys. 5.8. Transformator zapłonowy z wymiarami i rozmieszczeniem uzwojeń

Jak wykazała analiza w p. 2.4., optymalną pod względem energetycznym pracę reaktora można realizować przy reaktancji zwarcia transformatora około 30%. Konstrukcja rozdzielonych uzwojeń, zastosowana w modelu I, daje reaktancję zwarcia około 80%, natomiast w konstrukcji cylindrycznej współosiowej można uzyskać reaktancję zwarcia nie wyższą niż 20%. Aby uzyskać pożądaną reaktancję zwarcia transformatorów roboczych w modelu II zastosowano konstrukcję uzwojeń mieszaną, tj. część uzwojenia pierwotnego umieszczono na tej samej kolumnie co uzwojenie wtórne, a część na drugiej kolumnie. Rozmieszczenie uzwojeń na rdzeniu II modelu zasilacza przedstawia rys.5.9 a jego pozostałe parametry zawiera tablica 5.1.

Zbudowane modele umożliwiły przeprowadzenie badań eksperymentalnych reaktora plazmowego typu GlidArc w laboratorium Katedry Podstaw Elektrotechniki oraz w laboratorium GREMI Uniwersytetu w Orlanie.



Rys. 5.9 Rozmieszczenie uzwojeń transformatora II modelu zasilacza

Poza opisywanymi wyżej modelami zbudowano w Politechnice Lubelskiej z udziałem autorki 9 zintegrowanych układów elektromagnetycznych reaktora typu GlidArc, do badań laboratoryjnych i instalacji pilotujących, na zamówienia:

- Uniwersytetu w Orleanie – 6 zasilaczy do reaktorów 3-elektrodowych,
- Firmy Sunnen Arc Technology w Paryżu [91] – 1 zasilacz reaktora 3-elektrodowego,
- Instytutu Chemii Przemysłowej w Warszawie – 1 zasilacz do reaktorów 3- i 6-elektrodowych,
- Zakładów Metalurgicznych URSUS w Lublinie – stanowisko badawcze z reaktorem 3- i 6-elektrodowym.

Dane znamionowe zbudowanych zasilaczy zbliżone są do opisanych wyżej modeli. Wszystkie zbudowane zasilacze zintegrowane poddano próbom i badaniom eksperymentalnym a wybrane wyniki badań modeli podano poniżej. Badania te pozwoliły zweryfikować rozważania teoretyczne przeprowadzone w niniejszej pracy.

5.3. Badania eksperymentalne

Zbudowane modele poddano próbom, których wyniki przedstawiono w tablicach 5.2, 5.3 i 5.4. Przebiegi chwilowych wartości prądu i napięcia przedstawiono w postaci oscylogramów na rys. 5.10, 5.11 i 5.12.

Tablica 5.2. Wyniki badań eksperymentalnych modeli zintegrowanych

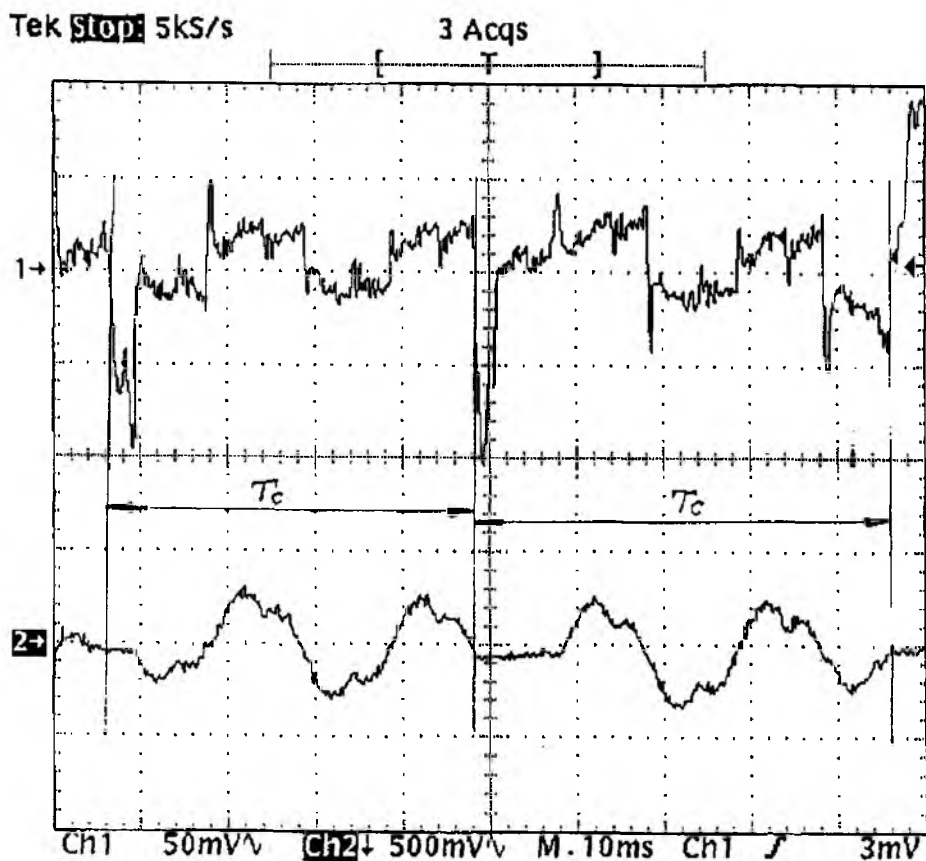
Model	Warunki pracy	U_1	I_1	S_1	P_1	U_2	I_2	S_2	P_2	R_1/X_2
		V	A	VA	W	V	A	VA	W	Ω
I 3-faz.	stan jałowy	380	0,35	230	41	1640	0	0	0	611 / 720
	stan zwarcia	380	14	9214	150	0	2,0	0	0	
	obciążenie	380	12	7898	1950	1100	1,8	3430	1640	
II 6-faz.	stan jałowy	380	0,6	395	76	2000	0	0	0	1070 / 907
	stan zwarcia	380	24	15700	600	0	2	0	0	
	obciążenie	380	20	13148	4900	1600	1,5	7200	4330	

Oscylogramy napięcia i prądu łuku przedstawia rys. 5.10. Prąd łuku podczas cyklu pracy reaktora jest praktycznie sinusoidalny, natomiast napięcie jest znacznie odkształcone i chociaż nie występuje przesunięcie fazowe między przebiegami prądu i napięcia, to moc pozorna S_2 , jako iloczyn skutecznych wartości napięcia U_2 i prądu łuku I_2 jest wyższa od mocy czynnej P_2 , bowiem występuje moc odkształcenia D_2 .

Dla wyznaczenia mocy czynnej łuku wystarczy znać wartość skuteczną prądu łuku i pierwszą harmoniczną napięcia łuku:

$$P_2 = U_{21h} \cdot I_2 \quad (5.23)$$

Analizę harmoniczných napięcia łuku w układzie sześcieelektrodowym podaje tablica 5.3. Krzywa napięcia jest nieparzysta o odwrotnej zgodności półokresów, więc wystąpią tylko harmoniczne nieparzyste.



Rys. 5.10. Oscylogramy napięcia (1) i prądu (2) elektrod reaktora

Tablica 5.3. Zawartość harmoniczných w napięciu łuku

U_1	I_1	U_2	I_2	U_{21h}	U_{23h}	U_{25h}	U_{27h}	U_{29h}	Długość elektrod	Liczba okresów w cyklu
V	A	V	A	%	%	%	%	%	mm	-
380	20	1500	1,5	100	27	21	18	10	200	3
380	20	1500	1,5	100	23	20	18	8	560	10

Wartość skuteczna napięcia łuku wyraża się poprzez procentową zawartość harmoniczných następująco:

$$U_2 = \sqrt{U_{21h}^2 + U_{23h}^2 + U_{25h}^2 + \dots}$$

Wykorzystując wyniki pomiarów z Tablicy 5.3 otrzymamy:

$$U_2 = U_{21h} \sqrt{1 + 0,27^2 + 0,21^2 + 0,18^2 + 0,1^2} = 1,077 \cdot U_{21h},$$

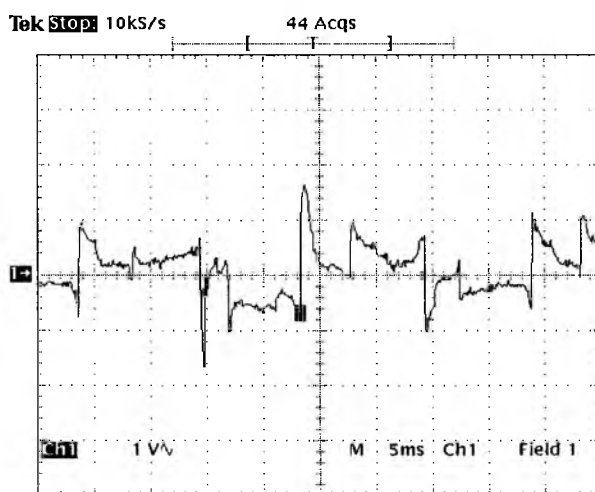
skąd: $U_{21h} = 0,93 \cdot U_2$

i $P_2 = U_{21h} \cdot I_2 = 0,93 \cdot S_2.$

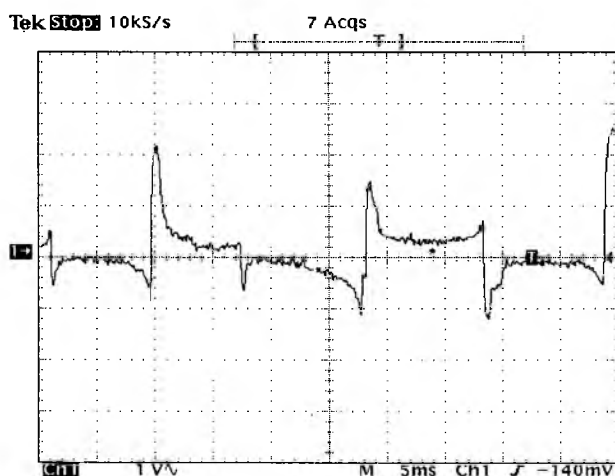
oraz $D_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} = S_2 \sqrt{1 - 0,93^2} = 0,37 \cdot S_2$

Zawartość harmoniczných w krzywej napięcia łuku mało zależy od długości elektrod, liczby okresów w cyklu i czasu ich trwania, więc wyniki podane w Tablicy 5.3 można uznać za reprezentatywne dla wszystkich reaktorów plazmowych typu GlidArc. Potwierdzają to także oscylogramy napięcia na elektrodach reaktora o różnych długościach przedstawione na rysunkach 5.11a i b. Kształt napięcia w obu przypadkach jest bardzo zbliżony. W przypadku dłuższych elektrod obserwuje się większą liczbę okresów napięcia w jednym cyklu pracy reaktora. W zależności od liczby okresów w cyklu pracy reaktora i czasu cyklu moc odkształcenia D_2 stanowi (30-40%) a moc czynna P_2 - (80-90%) mocy pozornej reaktora.

a)



b)

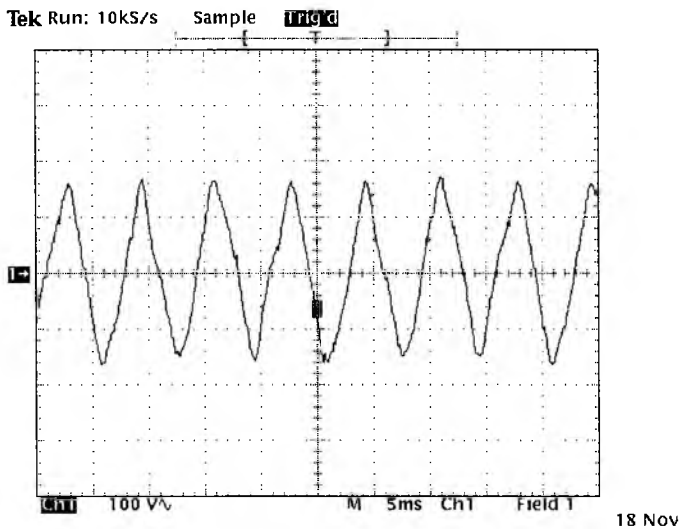


Rys. 5.11b. Oscylogramy napięcia na elektrodach modelu reaktora plazmowego dla a) długich (0.56m) i b) krótkich elektrod ((0.2m) elektrod reaktora

Uwzględniając zawartość harmoniczných napięcia między elektrodami reaktora można podać prostą zależność na moc czynną wyładowań w reaktorze plazmowym:

$$P_2 = (0,8 \div 0,9) \cdot U_2 \cdot I_2 \quad (5.24)$$

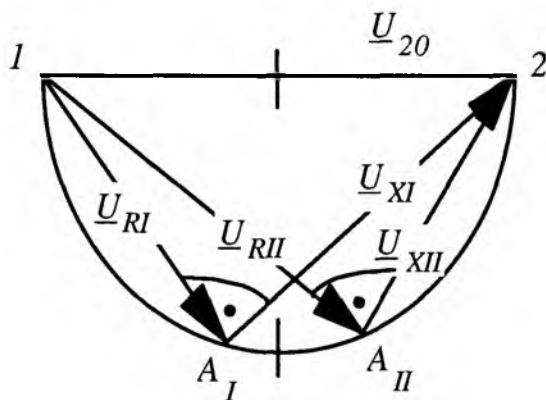
Napięcie na zaciskach transformatora zapłonowego U_{NNI} w stanie jałowym przedstawia oscylogram z rys. 5.12. Napięcie zapłonu przed rozpoczęciem wyładowania ma kształt w przybliżeniu sinusoidalny i częstotliwość 150Hz, natomiast po zapłonie napięcie elektrody zapłonowej maleje do wartości napięcia transformatorów roboczych. Oddziaływanie prądu zapłonu spowoduje zmniejszenie trzeciej harmonicznej indukcji a tym samym obniżenie wartości indukowanego napięcia transformatora zapłonowego.



Rys. 5.12. Oscylogram napięcia na zaciskach transformatora zapłonowego U_{NNI} w stanie jałowym

Rzeczywiste charakterystyki magnesowania transformatorów roboczych nie są jednakowe i w związku z tym w napięciu zapłonu wystąpi także składowa o częstotliwości 50Hz. W stanie jałowym, dla którego wykona-

no oscylogram przedstawiony na rys. 5.12. składowa ta jest niedostrzegalna i nie ma istotnego wpływu na pracę reaktora plazmowego typu GlidArc. Pomimo, że przebieg napięcia na elektrodach reaktora plazmowego jest odkształcony, dla zilustrowania stopnia wykorzystania mocy transformatora, przyjmiemy do rozważań tylko pierwszą harmoniczną napięcia U_{21h} i posłużymy się wykresem wektorowym (Rys. 5.13). Na wspólnym wykresie narysujemy rozkłady napięć w obwodach wtórnych obu modeli zasilacza, co pozwoli ocenić wpływ reaktancji rozproszenia na wykorzystanie mocy, którego miarą może być stosunek mocy pozornych na wejściu i wyjściu zasilacza S_2/S_1 (p.2.4).



Rys. 5.13. Wykresy wektorowe napięć w modelach I , II zasilaczy (Tablica 5.2)

Straty mocy w transformatorze zapłonowym nie przekraczają 30W i w rozważaniach energetycznych mogą być pominięte. Wyniki pomiarów i obliczeń układów zintegrowanych omawianych w pracy oraz dane o modelach zasilaczy stosowanych do zasilania reaktorów plazmowych GlidArc [35],[79] posłużyły do wyznaczenia parametrów energetycznych tych układów, które przedstawiono w tablicy 5.4. Dwa pierwsze układy z

tablicy 5.4 charakteryzują się bardzo niskim stosunkiem S_2/S_1 będącym miarą wykorzystania transformatora. Wynika z dużej różnicy pomiędzy napięciem stanu jałowego U_{20} i napięciem pracy U_2 (obydwa układy nie posiadają elektrody zapłonowej). W układach bez dodatkowego zapłonu stosunek reaktancji zwarcia zasilacza X_w do impedancji obwodu wtórnego zasilacza z łukiem $Z (x_w = X_w / \sqrt{(R_l + R_w)^2 + X_w^2})$ jest wysoki i wynosi ponad 95%. W modelach układów zintegrowanych udział reaktancji wewnętrznej zasilacza w impedancji wypadkowej jest mniejszy (Tablica 5.4).

Tablica 5.4. Charakterystyka energetyczna różnych modeli układów zasilania reaktorów plazmowych GlidArc

lp	UKŁAD	U_1	I_1	U_{20}	liczba elektrod	U_2	I_2	S_2/S_1	R_l	X_w	η	x_w
		V	A	V		V	A	-	Ω	Ω	%	%
1	Transformator + dławiki	380	608	8000	18	2000	5	0,04	400	1600	61	97
2	Magnetyczny potrójacz	380	10	7000	2	2000	0,2	0,06	10000	33500	76	95
3	Zintegrowany Model I	380	12	1640	3	1100	1,8	0,43	611	676	84	74
4	Zintegrowany Model II	380	20	2000	6	1600	1,5	0,55	1060	800	88	60

Jak wynika z analizy przeprowadzonej w rozdz. 2.4 najbardziej korzystne warunki pracy reaktora ze względu na wykorzystanie mocy zasilacza i stabilną pracę uzyskamy, gdy reaktancja źródła będzie wynosiła 30% impedancji wypadkowej obwodu. Układy zintegrowane pozwalają przybliżyć się do takich korzystnych warunków pracy reaktora.

Doświadczalne badania urządzeń elektrycznych z wyładowaniem łukowym nastroczają wiele trudności, z uwagi na niestabilność procesu

palenia się łuku, niepowtarzalność w czasie przebiegów wielkości elektrycznych, zakłócenia elektromagnetyczne przyrządów pomiarowych, wywołane badanym wyładowaniem łukowym. Przeprowadzenie badań kilkunastu modeli, użycie odpowiednich mierników i metod pomiarowych, oraz doświadczenie w prowadzeniu badań eksperymentalnych, umożliwiają oszacowanie dokładności uzyskanych wyników. Błędy, jakimi mogą być obarczone wyniki badań eksperymentalnych, przedstawione w pracy, nie przekraczają 5%.

Wyniki badań doświadczalnych modeli zasilaczy pozwoliły zweryfikować dopuszczalność przyjętych uproszczeń przy doborze modeli obliczeniowych, których dokładność można oszacować na poziomie 10%.

Badania eksperymentalne na modelach potwierdziły rozważania teoretyczne o pracy reaktora plazmowego GlidArc oraz pozwoliły zweryfikować i przyjąć proste metody wyznaczania mocy odkształcenia i mocy czynnej łuku.

5.4. Projektowanie zintegrowanych zasilaczy elektromagnetycznych reaktorów plazmowych

Projektowanie zintegrowanych zasilaczy elektromagnetycznych reaktorów plazmowych, ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym typu GlidArc, sprowadza się w zasadzie do wyznaczania parametrów konstrukcyjnych jednofazowych transformatorów tworzących układ zintegrowany. W pracy tych specjalnych transformatorów istotną rolę spełniają wyższe harmoniczne strumienia magnetycznego, których wartości zależą nie tylko od nieliniowości charakterystyki magnesowania magnetowodu, ale w równym stopniu od nieliniowego odbiornika. Przy wyborze mate-

riału na rdzeń i wartości indukcji, obok stosowanego w projektowaniu transformatorów kryterium strat mocy w stali i prądu magnesującego (poboru mocy biernej na magnesowanie), należy uwzględniać wartości wyższych harmoniczných indukcji. Również, w sposób szczególny należy potraktować zapewnienie wymaganej reaktancji rozproszenia (zwarcia) w projektowanych transformatorach zasilaczy zintegrowanych, która, jak to wynika z rozważań w p. 2.4, powinna wynosić około (30-40)%. Jest to wartość wyższa od stosowanych w transformatorach energetycznych i niższa niż w zasilaczach do urządzeń spawalniczych. Taką wartość reaktancji rozproszenia trudno uzyskać w konstrukcji uzwojeń współosiowych, gdzie nie przekracza ona 15%, ani w konstrukcji o uzwojeniach rozdzielonych, w której reaktancja ta wynosi powyżej 60% [26].

Zintegrowany zasilacz elektromagnetyczny do zasilania reaktorów plazmowych typu GlidArc stanowi układ czterech transformatorów jednofazowych; trzy do przenoszenia mocy oraz jeden do realizacji zapłonu (Rys. 5.3). Transformatory mocy projektowane są na napięcie wyjściowe (2 - 4) kV, o reaktancji zapewniającej napięcie zwarcia około 30% i dostatecznie dużej indukcji w rdzeniu, tak aby trzecia harmoniczna strumienia magnetycznego mogła być wykorzystana do realizacji zapłonu. Transformator zapłonowy, przyłączany pomiędzy punkty neutralne sieci i gwiazdy uzwojeń pierwotnych transformatorów roboczych, pracuje przy częstotliwości 150 Hz i napięciu wyjściowym (10 - 15) kV.

5.4.1. Założenia do projektowania

Reaktory ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym do plazmowej obróbki toksycznych gazów emitowanych do atmosfery nie zostały dotychczas uszeregowane pod względem stosowanych mocy jednostkowych, prądów i napięć; brak jest też ich danych katalogowych. Dotychczasowe doświadczenia francuskie [14], [16], [17],[18], [52], polskie [21], [29], [31], [77], [79], [80] i inne [13], [19], [20], [23], [24], [25], [53], [59], pozwalają określić pożądane wartości napięć roboczych, napięć zapłonu, natężenia prądu elektrod, które wynoszą:

napięcie robocze elektrod	$U_{20} = (2-4) \text{ kV},$
prąd elektrod	$I_2 = (1-5) \text{ A},$
liczba elektrod roboczych na jednym stopniu	3 lub 6
liczba stopni	1, 2 lub 3
napięcie zapłonu	$U_z = (10-15) \text{ kV}$
prąd elektrody zapłonowej	$I_z = (20-30) \text{ mA}$
liczba transformatorów zapłonowych	1,2 lub 3

Należy przypuszczać, że wymagane w instalacjach przemysłowych duże wydajności reaktorów plazmowych doprowadzą do powstania odpowiednich rozwiązań. Obecnie trudno przewidzieć, czy będzie to szereg równoległych komór plazmowych, jak ma to miejsce w generatorach ozonu, czy też tylko odpowiednia liczba elektrod we wspólnej komorze plazmowej. Liczba stopni szeregowych jest ograniczona samym procesem chemicznym, najczęściej jest to jeden stopień, rzadko więcej niż trzy. Reak-

tory plazmy nietermicznej powinny być pewne w ruchu i pracować w zasadzie bez obsługi.

Projektowanie układu sprowadza się do projektowania transformatorów o szczególnych wymaganiach odnośnie poziomu indukcji, kształtu charakterystyki magnesowania i wartości reaktancji rozproszenia (zwarcia).

Zasady projektowania transformatorów, szczególnie małych mocy, są szczegółowo opisane w bogatej literaturze [21], [37] i powszechnie znane. Tutaj odniesiemy się jedynie do zagadnień, które są specyficzne dla projektowania transformatorów zintegrowanych zasilaczy reaktorów plazmowych.

5.4.2. Materiał na rdzenie transformatorów roboczych

Ponieważ w zasilaczu zintegrowanym wykorzystuje się wyższe harmoniczne strumienia magnetycznego, na rdzenie transformatorów roboczych należy stosować materiał charakteryzujący się dostatecznie dużą prostokątnością krzywej magnesowania i możliwie niską indukcją nasycenia. Wymagania takie najlepiej spełniają niektóre taśmy amorficzne [88], ale są one jeszcze zbyt drogie. Taśmy zimnowalcowane ET-5 w tym zakresie wymagań mają wystarczające właściwości. Ich współczynnik prostokątności, tj. stosunek indukcji szczątkowej do indukcji nasycenia wynosi od 0,85–0,9, a indukcja nasycenia około 2T. W niektórych materiałach amorficznych np. *VITROVAC 6025F*, *METGLAS 2714A*, współczynnik prostokątności może być bliski jedności [88]. Dla zasilaczy według założeń przyjętych w p. 5.4.1 mogą być wykorzystane rdzenie zwiја-

ne produkowane z blach ET-5 przez Zakłady ZATRA w Skierniewicach. Na rdzenie transformatorów zapłonowych można stosować materiał taki jak dla transformatorów ogólnego przeznaczenia i nie zachodzi potrzeba precyzowania ich w szczególny sposób.

5.4.3. Indukcja w rdzeniach transformatorów roboczych

Wartość indukcji w rdzeniach zasilacza winna być tak dobrana, aby jej trzecia harmoniczna miała wystarczająco dużą wartość ($B_3 > 0,15 B_1$) i straty w stali nie były zbyt wysokie ($\Delta P < 3 \text{ W/kg}$). W zakresie indukcji od 1,2 do 2,3 T udział trzeciej harmonicznej dla blachy ET-5 jest w przybliżeniu liniowy i wynosi $B_3 = (15-20)\% B_1$. Charakterystykę magnesowania, straty mocy oraz udział trzeciej harmonicznej w rdzeniu wykonanym z blachy ET-5 podano w tablicy 5.4.

Tablica 5.4. Charakterystyki rdzenia z blachy ET-5

B	T	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3
H	A/m	340	750	1200	3700	7500	26200	41500
B_3	T	0,18	0,24	0,28	0,34	0,37	0,42	0,46
ΔP	W/kg	0,58	0,80	1,2	1,8	2,6	3,5	4,1

Określenie trzeciej harmonicznej indukcji w rdzeniach roboczych umożliwia obliczenie napięcia między punktami neutralnymi sieci zasilającej i połączonych w gwiazdę uzwojeń pierwotnych transformatorów mocy, na które należy zaprojektować uzwojenie pierwotne transformatora zapłonowego. Po tak dokonanych wyborze indukcji w rdzeniach transformatorów roboczych zasilacza zintegrowanego możemy zaprojektować ich rdzenie i uzwojenia.

5.4.4. Wymiary rdzeni

Przy projektowaniu transformatorów energetycznych powierzchnię czynną przekroju kolumny rdzenia obliczamy korzystając ze znanych wzorów Richtera lub Keshe'go [37], a następnie wyznaczamy pozostałe wymiary rdzenia, tj. wysokość kolumn, przekrój i długość jarzm. Do budowy transformatorów tak małych mocy, jak przyjęto w założeniach ($S_t < 10$ kVA) wykorzystuje się obecnie rdzenie zwijane. Producenci podają w katalogu wymiary rdzeni oraz szacunkową wartość mocy, jaką może osiągnąć transformator, zbudowany przy wykorzystaniu wybranego rdzenia. Przy projektowaniu dokonujemy wyboru rdzenia o danych wymiarach. Przyjmując wartość indukcji w rdzeniu, dla czynnej powierzchni rdzenia s_k , wyznaczamy napięcie zwojowe jako [37]:

$$e' = 4,44 f B s_k \quad (5.25)$$

Znając napięcie zwojowe i wymiary rdzenia możemy, dla założonych wartości napięć i natężenia prądu, zaprojektować uzwojenia transformatorów mocy.

5.4.5. Uzwojenia

Obliczanie liczby zwojów uzwojeń pierwotnego i wtórnego oraz przekrojów przewodów dla przyjętych w założeniach wartości napięć i prądów nie różni się od projektowania zwykłych transformatorów i nie będzie tu szczegółowo omawiane. Ważnym natomiast zagadnieniem jest odpowiednie ukształtowanie uzwojeń i takie ich rozmieszczenie na rdze-

niu, aby uzyskać wymaganą wartość reaktancji rozproszenia (zwarcia), taką dla której napięcie zwarcia zawiera się w granicach 30-40%. W konstrukcji współśrodkowej uzwojeń i przy szerokościach okna stosowanych w produkowanych rdzeniach zwijanych, tak dużych wartości reaktancji rozproszenia nie można uzyskać. Należy więc stosować konstrukcję “krażkową” uzwojeń, z jednym krażkiem uzwojenia pierwotnego i jednym krażkiem uzwojenia wtórnego na każdej kolumnie (Rys. 5.14) i odpowiednio dobrać odstęp między uzwojeniami δ . W ten sposób można uzyskać reaktancję zwarcia rzędu 20-50 %.

Korzystając z metod obliczania reaktancji rozproszeniowej transformatorów dwuuzwojeniowych przedstawionych w [10], stosując oznaczenia jak

na rys. 5.14 oraz wprowadzając zastępczą szczelinę $\partial' = \frac{a_1}{3} + \frac{a_2}{3} + \partial$,

reaktancję rozproszenia wyznaczamy z zależności:

$$X_r = X_z = 2\pi\mu_o f N^2 \frac{l_{ur}}{L_u} \partial', \quad (5.26)$$

gdzie: N – liczba zwojów uzwojenia w jednej kolumnie,

l_{ur} – średnia długość jednego zwoju,

L_u – grubość uzwojenia,

μ_o – przenikalność magnetyczna próżni.

Strata napięcia na reaktancji rozproszenia

$$u_r = X_r \cdot I = 2\pi\mu_o N^2 \frac{l_{ur}}{L_u} \cdot I \cdot \partial'. \quad (5.27)$$

$$\partial' = (30 - 40) \% \frac{e' \cdot L_u}{2\pi\mu_o \cdot f \cdot N \cdot I \cdot l_{sr}}. \quad (5.29)$$

Uwzględniając, że:

$$\delta + a_1 + a_2 = l_k \quad (5.30)$$

oraz znając wymiary rdzenia możemy tak dobrać wielkość szczeliny, aby reaktancja rozproszenia zapewniała napięcie zwarcia o wymaganej wartości.

Innym rozwiązaniem zapewniającym dużą reaktancję rozproszenia jest umieszczenie uzwojeń pierwotnego i wtórnego na oddzielnych kolumnach. Rozwiązanie to jest stosowane w transformatorach spawalniczych i rozproszeniowych do zasilania lamp wyładowczych. W takim rozwiązaniu "szczeliną" dla strumienia rozproszenia jest cała przestrzeń między jarzmami z wyłączeniem kolumn i umieszczonych na nich uzwojeń (Rys. 5.15).

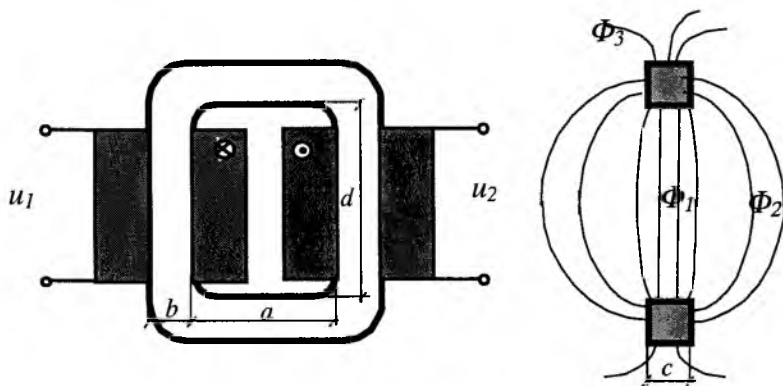
Sposób obliczania reaktancji rozproszenia i napięcia zwarcia w takim układzie jest inny niż w konstrukcji współśrodkowej i krążkowej uzwojeń i był przedmiotem wielu prac [10], [21], [26]. Wszystkie metody wyznaczania reaktancji rozproszenia takich transformatorów sprowadzają się do określenia permeancji jarzm i na jej podstawie strumienia rozproszenia indukowanego przez uzwojenie pierwotne i zamykającego się między jarzmami z pominięciem uzwojenia wtórnego.

Strumień rozproszenia dzieli się zwykle na trzy części:

Φ_1 – strumień pomiędzy powierzchniami wewnętrznymi jarzm,

Φ_2 – strumień pomiędzy powierzchniami bocznymi jarzm,

Φ_3 – strumień pomiędzy zewnętrznymi powierzchniami jarzm.



Rys. 5.15. Strumień rozproszenia w transformatorze o uzwojeniach rozdzielonych

Dla obszarów przez które przenikają poszczególne części strumienia oblicza się permeancje Λ_1 , Λ_2 , Λ_3 z zależności:

$$\begin{aligned}\Lambda_1 &= a \cdot \lambda_1, \\ \Lambda_2 &= \lambda_2 [a + b(2 + p \cdot p) + c], \\ \Lambda_3 &= \lambda_3 [a + b(1 + p \cdot q) + c].\end{aligned}\tag{5.31}$$

Oznaczenie wielkości a , b , c , d podano na rysunku 5.15, a wartości permeancji jednostkowych λ_1 , λ_2 , λ_3 oraz współczynniki p i q podaje się w funkcji stosunku d/b w postaci wykresów zamieszczonych w pracach [10], [26] i podanych na rys. 5.16.

Całkowita permeancja jest sumą permeancji trzech obszarów

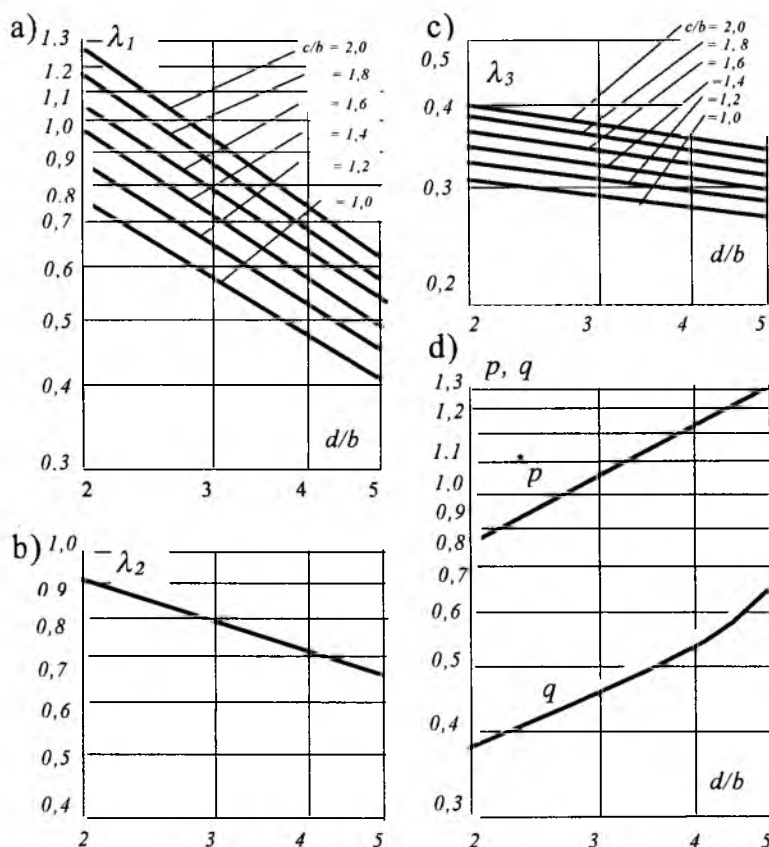
$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3\tag{5.32}$$

i pozwala obliczyć reaktancję zwarcia transformatora

$$X_r = X_z = 8 \pi^2 f \cdot N^2 \cdot \Lambda \cdot 10^{-9} \Omega \quad (5.33)$$

oraz względne (procentowe) napięcie zwarcia

$$u_z\% = u_r\% = \frac{I_n \cdot X_r}{U_n} \cdot 100\% \quad (5.34)$$



Rys. 5.16. Wykresy jednostkowych permeancji do obliczania jarzmowego strumienia rozproszenia [26]

Powyższą metodę zastosowano do obliczenia reaktancji zwarcia transformatora modelu I zasilacza zintegrowanego (p. 5. 1, Tablica 5.19). Sto-

sując przyjęte na rysunku 5.15 oznaczania, wymiary rdzeni (w centymetrach) transformatora modelu I są następujące:

$a = 5$; $b = 3,5$; $c = 3,5$; $d = 14$; liczba zwojów uzwojenia pierwotnego $N_1 = 400$, zaś odczytane z wykresu na rys. 5.16 dla $d/b = 4$, wartości współczynników $p = 1,15$, $q = 0,53$.

Jednostkowe permeancje trzech obszarów strumienia rozproszenia z rys. 5.15 odczytane z wykresów na rys. 5.16 wynoszą:

$$\lambda_1 = 0,48 \text{ H/cm}, \lambda_2 = 0,72 \text{ H/cm}, \lambda_3 = 0,28 \text{ H/cm}.$$

Podstawiając wyznaczone permeancje jednostkowe do zależności (5.31) otrzymano całkowitą permeancję dla strumienia rozproszenia w analizowanym transformatorze: $\Lambda = 27,6 \text{ H}$.

Zatem, reaktancja rozproszenia wyznaczona z zależności 5.33 wynosi:

$$X_z = 17,45 \Omega.$$

Wartość reaktancji zwarcia uzyskana z pomiarów (Tablica 5.2)

$$X_{z\text{pom}} = \frac{U}{\sqrt{3}I_z} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 14} = 15,6 \Omega.$$

Różnica między wyznaczoną analitycznie i pomiarowo wartością reaktancji rozproszenia modelu transformatora nie przekracza 12%, co wskazuje na praktyczną przydatność przedstawionej metody obliczeniowej w projektowaniu transformatorów o powiększonej reaktancji rozproszenia stosowanych w układach zasilania reaktorów plazmowych. Lepszą dokład-

ność uzyska się wyznaczając reluktancję dla strumienia rozproszenia metodami numerycznymi.

Przy smukłych rdzeniach, tj. przy stosunku $d/b > 3,5$, względne napięcie zwarcia może mieć wymaganą w układach zintegrowanych wartość 30-40%, natomiast przy mniejszych współczynnikach d/b , napięcie zwarcia będzie zbyt duże i wtedy należy stosować konstrukcję mieszaną uzwojeń, tak jak to podano przy opisie modelu zasilacza układu zintegrowanego w p. 5.2.

5.4.6. Transformator zapłonowy

Aby zaprojektować transformator zapłonowy należy najpierw określić napięcie między punktami neutralnymi sieci i gwiazdy uzwojeń pierwotnych transformatorów roboczych. Napięcie to jest indukowane przez trzecią harmoniczną strumienia magnetycznego i zależy od charakterystyk magnesowania i poziomu indukcji. Wartość trzeciej harmonicznej indukcji B_3 możemy obliczyć z uproszczonej zależności 5.19 (rozdział 5.1).

I tak, dla indukcji w rdzeniu transformatorów roboczych $B_I = 1,8 \text{ T}$, wartość trzeciej harmonicznej wynosi $B_3 = 0,34 \text{ T}$, ($B_3 = 0,18 B_I$). Znając indukcję B_3 określimy napięcie między punktami neutralnymi U_{NNI}

$$U_{NNI} = 3\sqrt{2}\pi \cdot 50 \cdot N_I \cdot A_{Fe} \cdot B_3, \quad (5.35)$$

gdzie: N_I – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego transformatorów roboczych,
 A_{Fe} – przekrój rdzenia transformatora roboczego.

Napięcie pierwotne transformatora zapłonowego stanowi około (50-60)% napięcia fazowego sieci zasilającej. Przy napięciu z sieci równym 380V wyniesie ono (110-130)V i na takie napięcie należy projektować uzwojenie pierwotne transformatora. Przekładnię transformatora zapłonowego należy tak dobrać, aby napięcie wtórne wynosiło (10-12) kV. Przekroje przewodów uzwojeń wyznaczyć należy tak, aby prąd zwarcia (zapłonu) mógł osiągnąć wartość 20 mA. Taka wartość prądu uzasadniona jest stosunkowo niskim poziomem indukcji w rdzeniach transformatorów roboczych, który sprawia, że trzecia harmoniczna strumienia magnetycznego jest silnie kompensowana przez prąd transformatora zapłonowego. Wskutek tego napięcie na jego zaciskach wtórnych szybko maleje, a prąd nie przekracza 20 mA. Inne zagadnienia związane z projektowaniem transformatora zapłonowego nie mają cech szczególnych i nie będą tu omawiane.

6. Podsumowanie

Od początku lat 90-tych obserwuje się intensywny rozwój badań nad wykorzystaniem metod plazmowych do neutralizacji toksycznych gazów emitowanych do atmosfery przez różne procesy technologiczne. Plazmowe metody obróbki gazów są bezodpadowe i często tańsze od stosowanych metod chemicznych.

Do wytwarzania plazmy niezbędnej w procesach neutralizacji gazów stosuje się metody wyładowań elektrycznych, a reaktory plazmowe do prowadzenia tych procesów są przetwornikami energii elektrycznej o bardzo szczególnych właściwościach. Układy zasilające te reaktory muszą więc spełniać wiele różnorodnych wymagań, takich jak: dostarczać energię elektryczną o odpowiednim napięciu, częstotliwości, kompensować moc bierną, symetryzować obciążenie jednofazowe i być energooszczędne. Aby spełnić te liczne wymagania, buduje się układy coraz bardziej złożone, a przez to mniej sprawne i bardziej zawodne.

Analiza układów zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wzdłuż elektrod wyładowaniem łukowym, której wyniki przedstawiono w niniejszej pracy, obejmuje następujące zagadnienia:

- przegląd wybranych konstrukcji reaktorów plazmowych, wykorzystujących różne rodzaje wyładowań elektrycznych, stosowanych w technologiach oczyszczania gazów,
- przedstawienie zasady budowy i działania nowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wzdłuż elektrod wyładowaniem łukowym typu GlidArc,
- teoretyczne i eksperymentalne wyznaczenie charakterystyk tego nowego reaktora,
- przeprowadzenie rozważań energetycznych, pozwalających na określenie obszaru korzystnej pracy reaktora plazmowego GlidArc i wyboru reaktancji transformatora zasilającego,
- przegląd modeli matematycznych i charakterystyk napięciowo-prądowych wyładowania łukowego stosowanych w analizie obwodów z łukiem elektrycznym,
- wybór modelu matematycznego wyładowania łukowego ślizgającego się wzdłuż elektrod, uwzględniającego zmiany długości kolumny łukowej, wymuszone prędkością przepływu gazu i zmienną odległością między elektrodami reaktora,
- sformułowanie nieliniowego równania różniczkowego modelującego pracę reaktora plazmowego dwuelektrodowego typu GlidArc, zasilanego z rzeczywistego źródła napięcia sinusoidalnego,
- obliczenia numeryczne układu reaktor – zasilacz zintegrowany w programie MathCAD 5 i opracowanie graficzne przebiegów chwilowych prądów i napięć oraz charakterystyk tego układu, prezentujących wpływ prędkości przepływającego gazu, długości elektrod reaktora, reaktancji wewnętrznej transformatorów zasilacza, na pracę układu,

- przegląd układów zasilania reaktorów plazmy nietermicznej wykorzystujących do wytwarzania plazmy różne rodzaje wyładowań elektrycznych, ze szczególnym uwzględnieniem układów do zasilania reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym oraz reaktorów o podobnej charakterystyce prądowo- napięciowej,
- analiza mocy i sprawności układów zasilania reaktorów plazmowych typu GlidArc,
- opracowanie nowego zintegrowanego układu zasilania reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, wykorzystującego w swej idei nieliniowość charakterystyk magnesowania magnetowodów transformatorów zasilających i podanie metody wyznaczania jego charakterystyki zewnętrznej,
- projekt i budowa modeli zintegrowanego układu zasilania reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym do badań laboratoryjnych i instalacji pilotujących w przemyśle,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych układu zintegrowanego, wyznaczenie jego charakterystyk w różnych stanach pracy,
- opracowanie teoretycznych podstaw projektowania zintegrowanych układów zasilania reaktorów plazmowych z wyładowaniem typu „gliding arc”.

Analiza numeryczna i badania doświadczalne pozwoliły stwierdzić następujące prawidłowości:

- ze wzrostem prędkości przepływu gazu poddawanego obróbce rośnie moc czynna przekazywana ze źródła zasilania do strefy wyładowań.
- konduktancja chwilowa przestrzeni międzyelektrodowej reaktora zmienia się w czasie cyklu pracy w szerokich granicach.

W analizowanym modelu amplituda konduktancji maleje w czasie cyklu pracy do $1/3$ wartości, natomiast statyczna, uśredniona za cykl pracy, konduktancja wyładowania łukowego zmienia się wraz z prędkością przepływu gazu w niewielkim zakresie; pięciokrotny wzrost prędkości przepływu gazu powoduje zaledwie 20% zmniejszenie konduktancji statycznej przestrzeni międzyelektrodowej. Zatem, zastąpienie łuku elektrycznego statyczną konduktancją, stosowane często w analizie obwodów z łukiem elektrycznym, może mieć miejsce także przy analizowaniu wyładowania łukowego typu GidArc jako odbiornika energii elektrycznej,

- skuteczna wartość napięcia między elektrodami reaktora, podczas ślizgającego się wyładowania łukowego, zależy, m.in. od: prędkości przepływającego gazu, długości elektrod oraz od charakterystyki zewnętrznej transformatorów zintegrowanego układu zasilania,
- reaktancja transformatorów zasilacza wpływa na przebiegi chwilowe napięcia międzyelektrodowego i prądu wyładowania. W obwodzie o małej reaktancji wewnętrznej transformatorów układu zasilającego obserwuje się znacznie większy wzrost chwilowej wartości napięcia ponad wartość napięcia kolumny łukowej, przy przechodzeniu prądu przez zero, niż w obwodzie o przewadze reaktancji. W układzie zintegrowanym, w którym reaktancja transformatorów roboczych ma wartość (30-60) %, nie obserwuje się praktycznie przerw bezprądowych, natomiast w obwodach o przewadze rezystancji przerwy bezprądowe są wyraźne.

Analiza pracy reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym wykazała, że wszystkie wymagania tych specjalnych

nieliniowych odbiorników mogą spełniać zasilacze zintegrowane o odpowiednio ukształtowanej charakterystyce zewnętrznej. Podstawowymi elementami zintegrowanych układów zasilania są specjalne jednofazowe transformatory, tak zaprojektowane i połączone, aby zapewnić stabilną nieprzerwaną pracę reaktora plazmowego.

W układzie zintegrowanym zapłon wyładowania realizowany jest przez transformator zapłonowy, którego uzwojenie pierwotne włączone jest na napięcie indukowane trzecią harmoniczną strumienia magnetycznego, powstającą wskutek nieliniowości transformatorów roboczych, a uzwojenie wtórne przyłączone jest do elektrody zapłonowej. Przenoszenie mocy do przestrzeni wyładowań odbywa się przez pierwszą harmoniczną strumienia głównego jednofazowych transformatorów. Dzięki takiemu rozwiązaniu następuje integracja funkcji zapłonu wyładowania, podtrzymania wyładowania po zapłonie i ograniczenia prądu wyładowania w jednym urządzeniu. Zapewnia ona stabilną pracę reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym bez konieczności stosowania dodatkowych elementów, niezbędnych w stosowanych dotychczas układach. Takie rozwiązanie pozwala obniżyć kilkakrotnie moc znamionową transformatorów roboczych, w stosunku do tradycyjnych układów transformatorowych i znacznie zmniejszyć koszty inwestycyjne i eksploatacyjne instalacji do plazmowej obróbki gazów.

Do ważniejszych osiągnięć naukowych zaliczam:

- opracowanie modelu matematycznego wyładowania łukowego w reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wzdłuż elektrod wyładowaniem, uwzględniającego wymuszony przepływ gazu i zmienną odległość między elektrodami reaktora;

- przeprowadzenie analizy numerycznej pracy reaktora plazmowego ze ślizgającym się wzdłuż elektrod wyładowaniem łukowym, zasilanym z rzeczywistego źródła napięcia sinusoidalnego,
- zaproponowanie nowego zintegrowanego układu zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym i innym reaktorów o podobnej charakterystyce prądowo- napięciowej, oraz opracowanie metody wyznaczania jego charakterystyki zewnętrznej odpowiednio do wymagań reaktora plazmowego;
- podanie wskazówek do projektowania zintegrowanych zasilaczy elektromagnetycznych reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

Mimo znacznych uproszczeń modeli matematycznych ślizgającego się wyładowania łukowego i układu zasilania, wyniki otrzymane na drodze analizy numerycznej oraz zmierzone w badaniach eksperymentalnych wykazują dużą zgodność ilościową i jakościową. Pozwala to stwierdzić poprawność zaproponowanego modelu matematycznego ślizgającego się wyładowania łukowego, uwzględniającego prędkość przepływu gazu i zmienną odległość między elektrodami reaktora, oraz dopuszczalność przyjętych założeń.

Przedstawione w pracy wyniki analizy zintegrowanych układów zasilania reaktorów plazmowych z wyładowaniem łukowym typu GlidArc, zweryfikowane obliczeniami numerycznymi i badaniami laboratoryjnymi, uzupełnione o metody projektowania takich układów zasilania, dokumentują realizację postawionego celu oraz udowadniają tezę pracy.

7. Literatura

- [1] Baraboi A., Hnatiuc E., Adam M.: *Study about one possibility of modelation of the electric arc*. Conference Materials of Seventh International Conference on Switching Arc Phenomena 1993, pp.1-4
- [2] Bartosik M.: *Some remarks about synchronous switching-off*. Co-report presented in the discussion at the Fourth International Symposium „Switching Arc Phenomena” 81, Part II: Post conference materials, 1981, pp. 98-105
- [3] Bobikov, M. A., Komarov, N. S., Siergiejev, A. S.: *Technika Wysokich Napięć*. WNT Warszawa 1967
- [4] Cassie A. M.: *Theorie nouvelle des arcs de rupture et de la rigidite des circuits*. Proceedings of the CIGRE, 1939, Rap.102
- [5] Celiński, Z.: *Podstawy fizyki plazmy w zastosowaniach technicznych*. WNT Warszawa 1970
- [6] Celiński, Z.: *Plazma*. Warszawa PWN, 1980
- [7] Chang, J.S., Lawless, P.A., Yamamoto, T.: *Corona Discharge Processing*. IEEE Transactions on Plasma Science 19, 1991, ss. 1152-1166
- [8] Chang, J.S.: *Advanced Corona Technology For The Lower Power Plasma Treatment Of Combustion Flue Gases: State-Of - The Art*. Proceedings of the II International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry HAKONE II, ed. by Technical University Lublin, 12-14 Sept. 1989, ss.103-108
- [9] Chua, L. O., Pen-Min Lin: *Komputerowa analiza układów elektronicznych. Algorytmy i metody obliczeniowe*. WNT Warszawa 1981

- [10] Ciganek L.: *Der Streunblindwiderstand des Transformators mit getrennter primärer und sekundärer Wicklung. Elektrotechnik und Maschinenbau*. 56. Jahrg, Heft 10, 1938
- [11] Ciok, Z.: *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*. WNT Warszawa 1983
- [12] Cividjan G. A.: *Arc Energy Conservation Equation*. Conference Materials of Seventh International Conference on Switching Arc Phenomena 1993, pp.14-18
- [13] Cojan, M., Simion, Al., Stinescu, R.: *Some Perspectives in the Use of Ferromagnetic Tripler in Industrial Installations for Electric Arc Producing*. Proceedings of The International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO' 94, Lublin, 8-9th Sept.1994, ss. 105-110
- [14] Cormier J. M., Richard F., Chapelle J.: *High speed photography apparatus applied to gliding arc studies*. Conference Materials of Seventh International Conference on Switching Arc Phenomena 1993, pp.313 - 315
- [15] Czarnecki L.: *An orthogonal decomposition of the current of non-sinusoidal voltage source applied to nonlinear loads*. International Journal on Circuit Theory and Application, vol. 11, no. 2, 1993
- [16] 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, ss. 147-152
- [17] Czernichowski, A. and Lesueur, H.: *Plasma applications to waste treatment*. First Annual INEL Conference, Idaho Falls, Idaho (USA), 16-17 Jan. 1991
- [18] Czernichowski, A., Lesueur, H.: *Multi-electrodes high pressure gliding discharges reactor and its application for some waste gas and vapor incineration*. Plasma Appl. to Waste Treatment First Annual INEL Conference, Idaho Falls, Idaho (USA), 16-17 Jan. 1991
- [19] Czernichowski, A., Janowski, T., Stryczewska, H. D.: *Performances of the Supplying Systems for Plasma Reactors*. Contributed Papers of 4th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Bratislava 1993, HAKONE IV, ss.111-116

- [20] Czernichowski, A., Ranaivosoloarimanana, A., Janowski, T., Stryczewska, H.D, Cojan, M.: *Plasma- Chemical Processing of CO₂ 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,ss. 19- 33
- [21] Czernichowski A., Czech T., Lesueur H.: *Incineration of some volative carbon and sulphur compounds by gliding electrical discharge*. Entropie No 164/165, pp.90, 1991
- [22] Dhali, S.K. and Sardja, I.: *Dielectric-barrier discharge for processing of SO₂ and NO_x*. J. Appl. Phys. 69, 1991, 6319-6324
- [23] Fridman A., Skop H., Saveliev A., Nester S., Kennedy L.: *Nonequilibrium gliding arc in fluidized bed*. ISPC-13, Symp. Proceedings, Vol. II, ed. By C.K. Wu, Peking University Press, China, pp. 802-806, 1997
- [24] Fridman A.A., Petrusov A., Chapelle J., Cormier J.M., Czernichowski A., Lesueur H., Stevefelt J.: *Modele physique de l'arc glissant*. J. Phys. III France 4, pp.1449-1465, 1994
- [25] Fridman A. A., Nester S., Yardimci O., Saveliev A., Kennedy L. A.: *Gliding arc plasma instability*. Proceedings of the 5th International Conference on ISPC-13, Symp. Proceedings, Vol. II, ed. By C.K. Wu, Peking University Press, China, pp. 819-825, 1997
- [26] Jabłoński M., Zakrzewski K.: *Analiza pracy transformatora rozproszeniowego*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 9, 1966
- [27] Janowski T.: *Magnetyczne potrajacze częstotliwości*. Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej 202, Elektryka 24, 1990, ss. 114
- [28] Janowski, T., Stryczewska, H.: *Magnetic Frequency Triplers: Another Way to Supply Ozonizers*. Ozone Science & Engineering, vol. 14, 1992, ss.139-152
- [29] Janowski, T., Stryczewska, D., Mastalarczuk, M., Yamada, S., Bessho, K.: *Performances of medium frequency supplying system for plasma reactor*. Journal of The Japan Society of Applied Electromagnetics, vol.1, No 2, 1993, ss.19-22
- [30] Janowski, T., Stryczewska, H.: *Hybrydowy zasilacz plazmotronu do prowadzenia reakcji chemicznych*. Patent PL No 172170, 1997

- [31] Janowski T., Stryczewska H.D.: *Application of the Third Magnetic Flux Harmonic of Transformer Cores in Plasma Reactors*, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.10 Nonlinear Electromagnetic Systems, IOS Press 1996, pp.31-34
- [32] Janowski, T., Stryczewska, H.D.: *Zasilacz plazmotronu do prowadzenia reakcji chemicznych*. Patent PL No 172152, 1997
- [33] 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, ss. 219-222
- [34] 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, Volume 2, Number 3, 1994., ss. 48-51
- [35] 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, pp. 35-42
- [36] 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, tom II, s. 243-246
- [37] Jezierski, E.: *Transformatory. Podstawy teoretyczne*. WNT Warszawa 1965
- [38] Kamińska A.: *Capacitance influence on current zero region processes in stabilized arc*. Archives of Electrical Engineering, 1995, vol. XLIV, No 1, pp. 29-38
- [39] Kamińska A.: *Analiza zjawisk cieplnych i elektrycznych w plazmotronie oraz obwodzie zasilającym prądu przemiennego w procesie wytwarzania plazmy niskotemperaturowej*. Rozprawy Elektrotechniczne, Nr 186, 1987
- [40] Kogelschatz U.: *Advanced Ozone generation*, in "Process Technologies for Water treatment, ed. By S. Stucki Plenum Press N. York-London, 1988, pp. 87
- [41] Kołaciński, Z., Campbell L.C., Cedzyńska, K., Glaba, M., Gaworczyk, J., Dokimuk, J.: *Decomposition of Toxic Wastes at Plasma*. Proceedings of The International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO' 94, Lublin, 8-9th Sept.1994, ss. 73-78

- [42] Kordus A.: *Plazma. Właściwości i zastosowania w technice*. WNT, Warszawa 1985
- [43] Królikowski, C.: *Technika łączenia obwodów elektroenergetycznych*. PWN Warszawa 1990
- [44] Królikowski, C.: *Jedna z metod analitycznego ujmowania charakterystyk napięciowo-prądowych łukowych palników plazmowych prądu stałego*. Rozprawy Elektrotechniczne 1972, z.2
- [45] Królikowski, C., Ratajczak J.: *Analiza parametrów charakteryzujących trójfazowe stabilizowane wyładowanie łukowe w palniku plazmowym*. Zeszyty naukowe Politechniki Poznańskiej 1986, Elektryka nr 31, s.47-61
- [46] Królikowski, C., Kamińska-Pranke, A.: *Plazmotrony jednofazowe prądu przemiennego*. Przegląd Elektrotechniczny 10/11/12, 1986, ss. 299-302
- [47] Królikowski, C., Kamińska-Pranke, A.: *Warunki palenia się łuku elektrycznego w jednofazowym obwodzie prądu przemiennego*. Rozprawy Elektrotechniczne, 1987, 33, z. 1, ss. 121-136
- [48] Królikowski, C., Namyślak, R., Niewiedział, R.: *The Direct Current Arc Plasmatrons for Toxic Substances Destruction*. Proceedings of The International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO' 94, Lublin, 8-9th Sept.1994, ss. 87-92
- [49] Królikowski, C., Kamińska-Pranke, A., Niewiedział, R.: *Zastosowanie prądu przemiennego do zasilania pieców metalurgicznych z plazmotronami łukowymi*. Przegląd Elektrotechniczny , 5, LXII, 1986, 145-150
- [50] Kruczinin A. M., Sawicki A.: *Zagadnienie nieokreśloności łuku elektrycznego w urządzeniach i systemach elektrotechnologicznych*. Prace Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów. XVIII SPETO, Gliwice-Ustroń, 17-20.05.1995, s.225-230
- [51] Kruczinin A. M., Sawicki A.: *Urządzenia elektrotechnologiczne z nagrzewaniem łukowym i plazmowym. Część 1. Teoria nagrzewania łukowego i plazmowego*. Skrypty Politechniki Częstochowskiej 17, 1997, ss. 200
- [52] 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

- [53] Lesueur, H., Czernichowski, A., Granops, M.: *Discharge plasma reactor for H₂S valorization or destruction*. ISPC-11
- [54] Lidmanowski, W.: *Zarys teorii wyładowań w dielektrykach*. WNT Warszawa 1988
- [55] Loh O.: *Die Lichtbogenarbeit beim Abschalten eines wechselstromkreises*. Archiv für Elektrotechnik, Bd. XLI, H.5, 1954, s. 281-300
- [56] Mayr O.: *Beiträge zur Theorie des statischen und dynamischen Lichtbogens*. Archiv für Elektrotechnik, vol. 37, 1943, pp.588-608
- [57] Miziołek, A.W., Herron, J.T., Mallard, W.G., Hudgens, J.W., Green, D.S., Tsang, W., Chang, J.S.: *Importance of Chemistry in Non-Thermal Plasma Control of Volatile Organic Compounds and Air Toxics*. Proceedings of The International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO' 94, Lublin, 8-9th Sept.1994, ss. 65-70
- [58] Dors M., Mizeraczyk J., Rea M.: *Investigation of NO_x removal N₂:O₂:CO₂:NO in a wire to cylinder corona discharge*. Conference proceedings of ELMECO'97, Lublin, pp 93-96.
- [59] Pellerin S., Cormier J. M., Chapelle J., Kassabji F.: *Investigation and modeling of cold arc discharge: chemistry and applications*. ISPC-13, Symp. Proceedings, Vol. II, ed. By C.K. Wu, Peking University Press, China, pp.813-818, 1997,
- [60] Pasternak, J.: *Analiza skrośnego nagrzewania indukcyjnego prądami o częstotliwości 150Hz*. Zeszyty Naukowe AGH, Elektrotechnika 22, Kraków 1992, s.78
- [61] Penetrante, B. M.: *Fundamental limitations of non-thermal plasma processing for internal combustion engine NO_x control*. Proceedings of the 4th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Bratislava 1993, ss. i- vi
- [62] Pollo, I.: *OZON. Właściwości, produkcja, zastosowania*. Prace Instytutu Matematyki, Fizyki i Chemii, Politechnika Lubelska, Wydawnictwa Uczelniane, Seria A, Nr 4, 1983, ss.103
- [63] Pollo, I., Rea, M., Wroński, M.: *NO_x and SO_x Removal in Pulse Corona discharge*. Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO' 94, Lublin, 8-9th Sept.1994, ss. 23-28
- [64] Popescu cl., Popescu M., Trusca V.: *Electric Arc Models/ Two Approaches the Same Final Results*. Proceedings of the 5th

- International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipment, Brasov, May 15-17 1996, pp.585-591
- [65] Praca zbiorowa pod kierunkiem Romualda Kosztaluka: *Technika Badań Wysokonapięciowych*. Tom 2, WNT Warszawa 1985
 - [66] Rodacki T.: *Analiza i synteza tyrystorowych układów zasilania i regulacji pewnych odbiorników łukowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka z.96, 1985, ss. 86
 - [67] Rosocha, L. A., Anderson, G.K., Bechtold L.A., Coogan, J. J., Heck G., Kang, M., McCulla, W. H., Tennant, R.A. and Wantuck P. J.: *Treatment of hazardous organic wastes using silent discharge plasmas*. In Non-Thermal Plasma Technics for Pollution Control. Part B: Electron Beam and Electrical Discharge Processing ed. by Bernie M. Penetrante and Shirley E. Schultheis, NATO ASI Series G: Ecological Sciences, Vol. 34
 - [68] Sawicki A.: *Uwarunkowania ekologiczno-energetyczne współczesnego rozwoju elektrotechnologii plazmowo-łukowych, cz.1. Analiza kierunków rozwoju współczesnych elektrotechnologii plazmowych*. Chemia i Inżynieria Ekologiczna 1995, t.2, nr 3, s.377-401
 - [69] Scarpa P., Legros W.: *Black box arc models: a sensitivity analysis*. Proceedings of the International Conference on Applied and Theoretical Electrotechnica, Craiova, Romania, 1991, pp. B 31
 - [70] Schmitd-Szałowski, K. and Jodzis, S.: *Kinetic characteristics of the ozone synthesis based on measurement of active power of the discharge*. Proc. of II Conference on Ozone Synthesis and Properties, Wilga 1992, ss.81-88
 - [71] Schmitd-Szałowski, K. and Jodzis, S.: *Kinetic characteristics of the catalytic ozone synthesis in electrical discharges*. Proc. of European Ozone Conference, Belgrad 1990, ss. 125-136
 - [72] Schmitd-Szałowski, K.: *Solid surface activated ozone synthesis in silent discharges*. Proc. of 10th International Symposium on Plasma Chemistry, Bochum 1991, 3.2-6
 - [73] Schwarz J.: *Berechnung von Schaltvorgängen mit einer zweifach modifizierten Mayr-Gleichung*, 1972, ETZ-A, 93, pp. 386-389.
 - [74] Sobek, V., Goldman, A., Goldman, M.: *Electrical parameters measurements of an AC corona discharge in a wire-to-plane configuration*. Proceedings of the 4rd International Symposium on

- High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Bratislava 1993, ss. 177-182
- [75] Stryczewska H. D.: *Układ zasilania reaktorów plazmy nietermicznej*. Zgłoszenie patentowe Nr P 317110 z dnia 19.11.1996
 - [76] Stryczewska H i inni: Raport z realizacji projektu badawczego KBN Nr 8 S502 010 05 pt. "Zintegrowany układ zasilania reaktorów ozonu". Praca niepublikowana, 84 strony, 1995
 - [77] Stryczewska, H.D.: *Design Aspects of Supplying Systems for Plasma Reactors*. Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej 236, Elektryka 27, 1994, ss. 19- 32
 - [78] 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, ss. 59-64.
 - [79] Stryczewska H. D.: *Analiza zintegrowanych zasilaczy elektromagnetycznych w urządzeniach wyladowczych*. Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej, ELEKTRYKA, 1996, ss. 132
 - [80] Stryczewska H. D., Janowski T.: *Integrated supplying systems of non-thermal plasma generator*. Proceedings of the 5th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipment, Brasov, May 15-17, 1996, pp.669-678
 - [81] Stryczewska H. D.: *New supply system of the non-thermal plasma reactor with gliding arc*. Archives of Electrical Engineering, No 4, 1997, pp. 379-399
 - [82] Stryczewska H. D.: *Enxrgxtiōcxskav Effxktiwnosti Sistxm Pitaniv Plazmxnnyh Reaktorow*. Enxrgxtika No 1-2, 1997
 - [83] Stryczewska H. D.: *Supply systems of non-thermal plasma reactors for environmental applications*. Post-conference proceedings of ELMECO'97 Conference, 1997, pp.43-50
 - [84] Szczepański, Z.: *Wyladowania niezupelne w izolacji urzadzēn elektrycznych*. WNT Warszawa 1973
 - [85] Szpor, S.: *Wytrzymałość elektryczna i technika izolacyjna*. PWN Warszawa 1959
 - [86] Turowski J.: *Obliczenia elektromagnetyczne elementōw maszyn i urzadzēn elektrycznych*. WNT Warszawa 1982
 - [87] Veis, A., Albert, J., Coste, C., Adatto, M., Benas, J.M.: *Electrical Power Supply for Ozone Generators*. Proc. of 8th IOA World Congress, Zurich, paper No A28, 1987

- [88] Wac-Włodarczyk A. i inni: Raport z realizacji projektu badawczego KBN Nr 8 8211 92 03 pt. *Hybrydowe układy przetwarzania częstotliwości*. Praca niepublikowana, 134 stron, 1994
- [89] Walczuk E.: *Arc erosion of silver based contacts materials in AC test conditions*. Proc. Of 14th ICEC 1988, Paris, 381-385
- [90] Wroński, M., Pollo, I., Samoylovitch, V. G.: *Nitrogen Oxides Formation in Silent Discharges and Ozone Application for Waste Water Treatment*. Proceedings of The International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO' 94, Lublin, 8-9th Sept.1994, ss. 29-34
- [91] Umowa licencyjna " *GlidArc Plasma Agreement*" pomiędzy autorami patentów P-300032 i P-301836 a Sunnen Technology SARL Paris 48 Bd Gouvion St. Cyr 75017 na produkowanie i sprzedaż zasilaczy plazmotronów łukowych we Francji

Electromagnetic supply system of the plasma reactor with gliding arc

S u m m a r y

Numerous advantageous of the plasma aided methods of water treatment and toxic gases destruction have given rise to an increasing interest in these methods can been observed in the last few years.

For these purposes, plasma is usually produced by electrical discharges in plasma reactors, which are energy receivers of very special properties. A plasma reactor supply system should meet many requirements, such as: to supply electrical energy of high voltage and increased frequency, to compensate the reactive power of the plasma reactor, to balance the single-phase load while being efficient and reliable.

The paper presents an analysis of the phenomena in ozone generators and plasma reactors with gliding arc. On the basis of this analysis, the requirements for their supply systems are formulated, the aspects of their design are discussed and the example of design is presented. The analysis shows that plasma reactor requirements can be satisfied by the systems making use of the higher magnetic flux harmonics induced in the core of the transformer, which is the main part of every supplier used in discharge systems.

The main results presented in the paper are the following:

- working out of the principle of operation of the plasma reactor with gliding arc and development of its supply system, which makes use of the third magnetic flux harmonic for arc ignition and the fundamental harmonic to carry power to the discharge zone;
- analysis of the plasma reactor operation and formulation of the new equivalent circuit of the plasma reactor with gliding arc necessary to its numerical analysis;
- formulation of the mathematical model of plasma reactor-supply system;
- carry out the experiments on the physical models of integrated supply systems and develop the methods of their design.

The author participated in the designing and construction processes of the integrated systems which, up to now, have found some applications in laboratory and some pilot ones in industry.