

POLITECHNIKA LUBELSKA
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

mgr inż. Grzegorz Komarzyniec

ANALIZA PRACY TRANSFORMATORA PIĘCIOKOLUMNOWEGO
W UKŁADZIE ZASILANIA ŁUKOWEGO REAKTORA PLAZMOWEGO

rozprawa doktorska

Promotor: prof. nadzw. PL, dr hab. inż. Henryka Danuta Stryczewska

Lublin 2008

Spis treści

1. Wstęp	3
1.1 Cel i teza pracy	7
1.2 Zakres pracy.....	8
2. Plazmotrony łukowe	10
2.1. Przegląd wybranych konstrukcji reaktorów plazmy łukowej.....	12
2.2. Plazmotrony z łukiem ekspansyjnym	18
3. Charakterystyki trójfazowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem.....	23
3.1. Zapłon ślizgającego się wyładowania łukowego.....	37
3.2. Cykl pracy reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem.....	38
3.3. Wpływ rodzaju gazu na wyładowanie elektryczne.....	42
3.4. Wpływ materiału elektrod na wyładowanie łukowe	45
3.5. Łuk trójfazowy.....	48
4. Układy zasilania odbiorników łukowych	55
4.1. Układy zasilania wykorzystujące właściwości obwodów magnetycznych	56
4.2. Półprzewodnikowe układy zasilania łukowych reaktorów plazmowych	62
5. Transformator pięciokolumnowy do zasilania łukowych reaktorów plazmowych.....	65
5.1. Przekładnia dodatkowa transformatora	70
5.2. Model transformatora pięciokolumnowego.....	73
5.3. Projekt zasilacza laboratoryjnego	79
5.3.1. Założenia do projektowania	79
5.3.2. Budowa rdzenia i uzwojeń zasilacza	80
6. Badania eksperymentalne zasilacza.....	85
6.1. Charakterystyki stanu jałowego zasilacza	85
6.2. Próba zwarcia zasilacza	92
6.3. Charakterystyka zewnętrzna zasilacza.....	98
6.4. Zapłon w reaktorze plazmowym.....	100
6.5. Obciążenie plazmotronem	102
7. Zalecenia do projektowania zasilaczy trójfazowych na rdzeniach zwijanych	108
7.1. Rdzeń transformatora.....	109
7.2. Reaktancja zwarcia	111
8. Uwagi i wnioski końcowe	116
Literatura	120
Publikacje autora dotyczące tematu pracy.....	124

1. Wstęp

Historia wykorzystania plazmy w technice rozpoczyna się około roku 1800 kiedy to Sir Humphry Bartholomew Davy rozpoczął badania nad wyładowaniem łukowym w powietrzu. Osiem lat później, Davy opracowuje lampę łukową, a w 1878 r. Ernst Werner von Siemens wynajduje i patentuje piec łukowy do wytopu stali. W roku 1901 Guglielmo Marconi wykorzystuje łuk elektryczny do transmisji radiowej przez Atlantyk. Równocześnie trwają prace badawcze nad wyładowaniami w gazach. Jako pierwszy zjonizowany gaz zbadał i opisał w roku 1839 Michael Faraday, zaś w roku 1879 Sir William Crookes zwrócił uwagę na to, że wyładowania w gazach można traktować jako czwarty stan skupienia materii. Wiele lat później, bo w roku 1923, Irving Langmuir wprowadza termin plazma. Od czasów Langmuira pojęcie plazmy uległo zmianie i obecnie przez plazmę rozumie się zjonizowany gaz będący quasi-neutralną mieszaniną swobodnych jonów, elektronów i cząstek obojętnych. Energia cząstek plazmy może zawierać się w bardzo szerokim zakresie wynoszącym od 0,2 eV do 2 MeV, dlatego może się ona bardzo różnić stopniem jonizacji i właściwościami. Ze względu na to, że plazma może występować w szerokim zakresie temperatur i ciśnień, wprowadza się podział na plazmę niskociśnieniową i wysokociśnieniową oraz plazmę niskotemperaturową (zimną) i wysokotemperaturową (gorącą). Za plazmę niskotemperaturową zwykło przyjmować się częściowo zjonizowany gaz znajdujący się w przedziale temperatur od 2 000 K do 30000 K. Plazma wysokotemperaturowa jest gazem prawie całkowicie zjonizowanym, w którym większość jonów jest wielokrotnie zjonizowanych a niektóre mogą być swobodnymi jądrami ogołoconymi ze wszystkich elektronów. Plazma ta obejmuje zakres temperatur od 10 mln K do 1 000 mln K. Do plazmy wysokotemperaturowej, pod względem równowagi termodynamicznej, zbliżona jest plazma wysokociśnieniowa obejmująca zakres ciśnień powyżej 100 kPa. Natomiast przy ciśnieniach mniejszych niż 100 Pa występuje plazma niskociśnieniowa charakteryzująca się brakiem równowagi termodynamicznej.

Między gazem a plazmą nie ma wyraźniej granicy, stąd za granicę przejścia od gazu do plazmy uznaje się moment, w którym niewielka jeszcze ilość naładowanych cząsteczek materii zmienia jej właściwości i pojawia się przewodnictwo elektryczne. Plazma jest normalnym stanem skupienia materii w temperaturach rzędu 10 000 K i wyższych. Z plazmy zbudowane są gwiazdy oraz gaz międzygwiazdny, co czyni ją najczęściej

spotykanym stanem skupienia materii we Wszechświecie. W warunkach ziemskich występuje w zorzy polarnej i wyładowaniach atmosferycznych.

Dla celów technicznych i laboratoryjnych wytwarza się plazmę niskotemperaturową, najczęściej przez wyładowania elektryczne w gazie, w urządzeniach zwanych reaktorami plazmowymi. Tak generowana plazma zdobywa coraz szersze zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i przemysłu. Powstają nowe rodzaje reaktorów plazmowych, a istniejące są usprawniane i doskonalone. Obecnie plazma wykorzystywana jest w hutnictwie i odlewnictwie, przemyśle budowy maszyn, przemyśle mikroelektronicznym, plazmochemii, badaniach kosmicznych, laboratoriach medycznych oraz w ochronie środowiska.

Ochrona środowiska naturalnego jest priorytetową dziedziną w rozwoju cywilizacji. Współczesne technologie oferują wiele rozwiązań, które mogą być lub są stosowane w ochronie środowiska, jednak szczególna uwaga została zwrócona ku metodom plazmowym [1], [2], [3], [4]. Jedną z bardziej obiecujących technologii jest wykorzystanie niskotemperaturowej plazmy generowanej przy ciśnieniu atmosferycznym w reaktorach ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym [30], [31]. W reaktorach tych w chwili zapłonu wyładowanie ma charakter łuku krótkiego, znajdującego się w stanie równowagi termodynamicznej. Pod wpływem występujących w komorze wyładowczej sił elektrodynamicznych i gazodynamicznych oddziałujących na kolumnę łukową następuje ruch wyładowania wzdłuż elektrod. W wyniku kilkukrotnego wzrostu długości i objętości, wyładowanie osiąga stan łuku długiego znajdującego się w stanie nierównowagowym. Łuk rozwija się tak długo, dopóki układ zasilania jest w stanie pokrywać straty energii wyładowania do otoczenia. Na czas trwania jednego cyklu pracy reaktora ma wpływ wiele czynników, spośród których wymienić należy: wymiary i kształt elektrod, prędkość przepływu ośrodka gazowego przez komorę wyładowczą, skład chemiczny gazu w jakim zachodzi wyładowanie, napięcie i prąd elektrod oraz częstotliwość napięcia zasilającego.

Zalety plazmy oraz szeroki zakres zastosowań reaktorów plazmowych sprawiają, że zainteresowanie plazmą wzrasta i aktualnie problematyką tą zajmują się ośrodki naukowe w Japonii, Stanach Zjednoczonych, Francji i Rosji. W Polsce od kilkunastu lat badania w tej dziedzinie prowadzone są w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej oraz wielu innych ośrodkach badawczych w Częstochowie, Gdańsku, Łodzi, Poznaniu, Szczecinie, Warszawie, Wrocławiu.

Prowadzenie dowolnego procesu wykorzystującego plazmę, powinno być oparte na znajomości jej właściwości oraz opanowaniu metod jej otrzymywania, gdyż plazmy nie można magazynować i transportować. Dlatego też na świecie badania nad plazmą koncentrują się nad uzyskaniem kontrolowanych reakcji plazmochemicznych. Od stałości parametrów generowanej plazmy w dużym stopniu zależy powtarzalność prowadzonych z jej udziałem procesów. Parametry plazmy niezbędne dla poprawnego przebiegu reakcji uzyskuje się poprzez kontrolowanie warunków, w jakich pali się wyładowanie tj. składu chemicznego gazu plazmotwórczego, jego ciśnienia i wilgotności oraz poprzez kontrolowanie parametrów materiału poddawanego obróbce plazmowej. Duże znaczenie dla generowania plazmy o odpowiednich parametrach ma prawidłowo dobrany układ zasilania. Jego rozwiązania muszą spełniać wymagania reaktorów plazmowych [65], [66], które są specjalnymi odbiornikami energii elektrycznej o nieliniowych charakterystykach i szybkich zmianach wartości chwilowych prądów, napięć i konduktancji przestrzeni wyładowczej.

Poprzez układ zasilania można wpływać na moc wyładowania, temperaturę generowanej plazmy, stopień jonizacji gazu, a więc wpływać na parametry elektryczne i termiczne wyładowania zachodzącego wewnątrz komory wyładowczej urządzenia plazmowego. Ze względu na niewielką liczbę pełnych i wiarygodnych danych eksperymentalnych w literaturze, łukowe reaktory plazmowe nie zostały do chwili obecnej uszeregowane pod względem stosowanych mocy jednostkowych, napięć i prądów. Nie istnieją też ogólne wytyczne do sposobu projektowania ich układów zasilania. Dotychczasowe doświadczenia pozwalają natomiast określić korzystne wartości parametrów zasilania niektórych ich konstrukcji [34], [35]. Aby dokonać wyboru najkorzystniejszego wariantu układu zasilania należy rozważyć wymagania, jakie stawia proces technologiczny prowadzony z wykorzystaniem reaktora plazmowego, jak również określić wpływ układu zasilania na pracę reaktora oraz jego współpracę z siecią zasilającą.

Od strony projektowania układów zasilania reaktorów plazmowych istotnym problemem jest opisanie wyładowania elektrycznego jako obciążenia, głównie zaś sformułowanie zależności między chwilową wartością konduktancji łuku a prądem lub napięciem. Należy też brać pod uwagę wiele zjawisk o charakterze ciągłym lub przejściowym, jakie zachodzą w komorze wyładowczej podczas pracy reaktora plazmowego, które mogą istotnie wpływać na stabilność pracy układu reaktor-zasilacz. Wiąże się to z koniecznością prowadzenia badań modeli i prototypów konstrukcji reaktorów oraz ich układów zasilania w różnych warunkach pracy. Często buduje się

układy zasilania wyspecjalizowane do współpracy z konkretnym typem plazmotronu. Ważnymi parametrami, które należy brać pod uwagę przy projektowaniu i konstruowaniu układów zasilania do zastosowań przemysłowych, jest ich niezawodność oraz niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

Wraz z postępem w dziedzinie elementów i układów energoelektronicznych coraz większe zastosowanie do zasilania reaktorów plazmowych z różnymi typami wyładowań elektrycznych, znajdują układy przekształtnikowe [33], [77]. Zapewniają one, wymaganą dla zasilania urządzeń wyładowczych, charakterystykę prądowo-napięciową [66], łatwość sterowania mocą dostarczaną do komory wyładowczej reaktora oraz dobrą współpracę z układami automatyzacji reaktora, takimi jak: kontrola położenia elektrod czy składu gazu w jakim zachodzi wyładowanie. Sterowane mikroprocesorowo przekształtnikowe układy zasilania reaktorów plazmowych są wrażliwe na zakłócenia elektromagnetyczne, wyższe harmoniczne oraz przepięcia generowane przez ślizgające się wyładowanie łukowe, co ogranicza ich zastosowania, zwłaszcza do zasilania reaktorów przemysłowych o dużych mocach.

Podstawowym elementem wszystkich układów zasilania reaktorów plazmowych jest transformator, który w odpowiednim wykonaniu może stanowić dobre źródło zasilania. Wykorzystując właściwości obwodów elektromagnetycznych można, uzyskać w jednym urządzeniu integrację podstawowych funkcji układu zasilania, tj. jonizację przestrzeni międzyelektrodowej, zapłon i podtrzymanie wyładowania podczas cyklu pracy plazmotronu oraz ograniczenie prądu zwarciovego [68], [69].

Jednym z takich rozwiązań jest układ zintegrowany opracowany w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej [74], [75]. Układ wykorzystuje cztery transformatory jednofazowe odpowiednio ze sobą połączone i przyłączone do sieci trójfazowej. Układ zintegrowany dla poprawnej pracy wymaga wprowadzenia trzech transformatorów w stan bliski nasyceniu, co istotnie ogranicza możliwości regulacji mocy wyjściowej układu. Tej niedogodności pozbawiony jest układ zasilania wykorzystujący transformator pięciokolumnowy.

Pięciokolumnowa konstrukcja rdzenia pozwala na budowanie względnie małogabarytowych transformatorów przy zachowaniu dużych mocy oraz zmniejszeniu strat dodatkowych w rdzeniu i elementach konstrukcyjnych transformatora. Nieuzwojone kolumny zewnętrzne łączą jarzmo górne z jarzmem dolnym transformatora i tym samym stanowią dla jednakofazowych strumieni magnetycznych drogę o małej reluktancji. W trójkolumnowej konstrukcji transformatora strumienie magnetyczne, przy trójfazowym

zasilaniu, zmuszone są do wychodzenia z rdzenia i zamykania się przez powietrze, olej, oraz elementy konstrukcyjne. W typowych konstrukcjach transformatorów pięciokolumnowych strumienie zamykające się przez kolumny niezwojone nie są wykorzystywane na tej drodze. Zaproponowano wykorzystanie energii tych strumieni w trójfazowym transformatorze pięciokolumnowym, uzwajając kolumny zewnętrzne (jarzma). Napięcie, indukowane w tych uzwojeniach wykorzystano do zasilania układów zapłonowych reaktorów plazmowych. Energia strumieni magnetycznych zamykających się w kolumnach zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego jest w zaproponowanym rozwiązaniu wykorzystana do jonizacji i przebicia przestrzeni międzyelektrodowych reaktora plazmowego. Współpraca transformatora pięciokolumnowego z łukowym reaktorem plazmowym, jak wynika z przeprowadzonego przeglądu literatury, nie była dotychczas przedmiotem badań i stanowi nowe zagadnienie badawcze.

Proponowany układ zasilania wykorzystujący transformator pięciokolumnowy jest rozwiązaniem tanim i niezawodnym równocześnie spełniającym wymagania łukowych reaktorów plazmowych, związane z zapłonem wyładowania, jego podtrzymaniem po zapłonie oraz ograniczeniem prądu. Przeprowadzona analiza jego współpracy z reaktorem plazmowym pozwoliła potwierdzić celowość stosowania tego typu konstrukcji, zaś uzyskane dane i opracowane stanowisko badawcze są podstawą dla dalszych prac nad rozwojem układów zasilania dla reaktorów plazmowych z wyładowaniami elektrycznymi.

Problem zasilania łukowych reaktorów plazmowych oraz poszukiwanie układów mogących sprostać wymaganiom plazmotronów jest ciągle aktualny. Ze względu na złożoność zjawisk zachodzących w reaktorach plazmowych i współpracujących z nimi układach zasilania jest to tematyka trudna, słabo rozpoznana i wymagająca dalszych prac badawczych.

1.1. Cel i teza pracy

Będący przedmiotem analizy trójfazowy transformator pięciokolumnowy obciążony łukowym reaktorem plazmowych jest układem na tyle złożonym, że bezpośrednio określenie jego zachowania się w różnych stanach pracy jest praktycznie niemożliwe. Specyfika reaktora plazmowego, jako odbiornika energii elektrycznej i nieliniowość transformatorów układu zasilającego sprawiają, że współpraca obu tych urządzeń może być źródłem trudnych do przewidzenia zjawisk.

Celem pracy jest zbadanie możliwości stosowania pięciokolumnowego transformatora trójfazowego w układzie zasilania łukowego reaktora plazmowego, a w szczególności możliwości wykorzystania strumienia kolumn niezwojonych do zapłonu wyładowania elektrycznego. Wykonane badania pozwolą stwierdzić celowość stosowania transformatorów o rdzeniach pięciokolumnowych do zasilania łukowych reaktorów plazmowych oraz umożliwią podanie wskazówek dotyczących projektowania transformatorów tak, by współpraca układu zasilania z reaktorem plazmowym była korzystna. Zebrane przy realizacji pracy wyniki doświadczeń pozwolą lepiej poznać zjawiska występujące przy współpracy transformatora z plazmotronem i będą przydatne w dalszych pracach badawczych nad układami zasilania łukowych reaktorów plazmowych.

Tezę pracy sformułowano następująco:

Możliwe jest wykorzystanie strumienia kolumn niezwojonych rdzenia pięciokolumnowego transformatora trójfazowego do zapłonu wyładowania w reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

Badania nad transformatorem pięciokolumnowym do zasilania łukowych reaktorów plazmowych prowadzone były częściowo w ramach projektu badawczego promotorskiego MNiSW Nr. N510 021 31/1039 nt. „Analiza pracy transformatora pięciokolumnowego w układzie zasilania łukowego reaktora plazmowego” realizowanego pod kierownictwem dr hab. inż. Henryki Danuty Stryczewskiej, prof. PL.

1.2. Zakres pracy

W pracy przeanalizowano zjawiska fizyczne i elektryczne zachodzące przy współpracy transformatora pięciokolumnowego, z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi, z łukowym reaktorem plazmowym. W celu potwierdzenia postawionej tezy przeprowadzono badania eksperymentalne na opracowanych modelach fizycznych transformatora pięciokolumnowego. Na podstawie uzyskanych wyników zaprojektowano, zbudowano i uruchomiono zasilacz laboratoryjny przeznaczony do zasilania trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową. Pozytywne wyniki współpracy transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi z reaktorem plazmowym potwierdziły prawidłowość postawionej tezy i stanowią źródło wytycznych do projektowania zasilaczy wieloelektrodowych reaktorów łukowych.

W rozdziale 1 pracy zawarto wstęp, cel oraz tezę. We wstępie przedstawiono historię badań nad wyładowaniami elektrycznymi w gazach, będącymi obecnie podstawowym

źródłem plazmy wykorzystywanej w nauce i technice. Omówiono pojęcie plazmy oraz dokonano jej klasyfikacji. Zwrócono również uwagę na szerokie zastosowanie plazmy generowanej wyładowaniami elektrycznymi w wielu procesach przemysłowych oraz zauważalny na przestrzeni ostatnich lat wzrost zainteresowania tą tematyką badawczą w wielu ośrodkach naukowych. Stosowane obecnie w technice i będące przedmiotem badań naukowych reaktory plazmowe omówiono szerzej w rozdziale 2. Z uwagi na dużą różnorodność konstrukcji ograniczono się do omówienia wybranych rozwiązań łukowych reaktorów plazmowych wykorzystywanych od wielu lat w przemyśle oraz takich, które dają nadzieję na ich implementację w technologiach perspektywicznych. Szczególną uwagę zwrócono na trójfazowe reaktory plazmowe ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym jako alternatywę dla konwencjonalnych metod utylizacji zanieczyszczeń gazowych emitowanych do atmosfery. Ze względu na niewielką liczbę pełnych i wiarygodnych danych dotyczących takich konstrukcji scharakteryzowano trójfazowe reaktory plazmowe ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym jako odbiorniki energii elektrycznej. Uzyskane z badań doświadczalnych charakterystyki statyczne i dynamiczne reaktora zamieszczono i przedyskutowano w rozdziale 3. Zwrócono uwagę, że przebiegi charakterystyk reaktora plazmowego zależą od zjawisk, jakie zachodzą w przestrzeni międzyelektrodowej i na powierzchni elektrod reaktora. Omówiono zatem, wpływ czystości gazu plazmotwórczego na procesy wyładowań elektrycznych w reaktorach plazmowych oraz przedstawiono sposób określania stopnia jego jonizacji. Poruszono również problematykę erozji elektrod oraz jej negatywnego wpływu na pracę urządzenia łukowego oraz prowadzonego z jego udziałem procesu plazmowego. Na podstawie rozważań zawartych w rozdziale 3 stwierdzono, że trójfazowe reaktory plazmowe ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym są odbiornikami energii elektrycznej o szczególnych cechach i nie jest możliwe precyzyjne określenie punktu ich pracy. Możliwe natomiast jest wyznaczenie obszarów stabilnej pracy i na tej podstawie określenie najbardziej korzystnych parametrów układu zasilania. W rozdziale 4 przedstawiono wybrane konstrukcje układów zasilania reaktorów plazmowych, omawiając niezawodne i sprawne układy, opracowane w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, wykorzystujące właściwości obwodów magnetycznych transformatorów oraz, coraz popularniejsze układy z elementami energoelektronicznymi. Rozdział 5 przedstawia badania i analizę pracy transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi, wykonanego z rdzeni zwijanych i przeznaczonego do zasilania łukowych reaktorów plazmowych. W rozdziale tym przybliżono ideę wykorzystania energii

strumieni zamykających się w kolumnach zewnętrznych transformatora do wstępnej jonizacji i przebicia przestrzeni międzyelektrodowych reaktora plazmowego. Na podstawie wyników eksperymentów z modelem transformatora oraz znajomości charakterystyk reaktora plazmowego zaprojektowano i zbudowano pięciokolumnowy transformator z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi do zasilania trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową.

Wyniki badań tego transformatora dla różnych stanów jego pracy oraz przy obciążeniu reaktorem plazmowym zostały omówione w rozdziale 6. Szczególną uwagę zwrócono na przebieg charakterystyk uzwojeń kolumn zewnętrznych. Kształt tych charakterystyk przesądza o możliwości stosowania transformatora z rdzeniem pięciokolumnowym do zasilania łukowych reaktorów plazmowych z wydzielonymi układami zapłonowymi. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że analizowana konstrukcja transformatora wykazuje cechy pożądane dla układów zasilania reaktorów plazmowych.

Przeprowadzona analiza transformatora pozwoliła na sprecyzowanie w rozdziale 7 wytycznych do projektowania transformatorów pięciokolumnowych, z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi, do zasilania łukowych reaktorów plazmowych. Ostatni, rozdział 8, stanowi podsumowanie pracy, zawiera uwagi i wnioski końcowe oraz podaje, najważniejsze, zdaniem autora rozprawy, osiągnięcia naukowe.

2. Plazmotrony łukowe

Każdy łuk elektryczny w gazie jest źródłem plazmy. Jednakże ze względu na znaczną niestabilność łuk palący się swobodnie jest praktycznie nieprzydatny do wielu zastosowań technologicznych. Długość łuku swobodnego, jego położenie w przestrzeni, objętość oraz charakterystyki plazmy nim generowanej nieustannie zmieniają się w sposób losowy. Czyni to łuk niesterowalnym i nie poddającym się kontroli z punktu widzenia utrzymania wymaganych charakterystyk niezbędnych w procesach plazmowych. Mimo swych wad łuk swobodny znalazł zastosowanie w urządzeniach do spawania łukowego, w których nie jest wymagane dokładne utrzymywanie parametrów plazmy. Łuk taki płonie również w piecach łukowych między elektrodą grafitową i nagrzewaną powierzchnią wsadu. Mimo, iż w piecach łuk pali się niemal pionowo, wahania jego parametrów elektrycznych [5], [6], [7], i cieplnych [8] powodują problemy z ich opanowaniem i sterowaniem. Plazma łuku swobodnego charakteryzuje się również stosunkowo niską

jakością parametrów technologicznych i energetycznych a plazmotron z łukiem swobodnym niekorzystnie oddziałuje na zasilającą sieć elektryczną [9].

Szybki rozwój technik generacji plazmy znacznie rozszerzył możliwości wykorzystania urządzeń plazmowych [10], [11]. Wygodniejszy w różnego typu zastosowaniach od plazmy łuku palącego się między elektrodami okazał się łuk elektryczny stabilizowany ściankami reaktora i przepływającym gazem, wytwarzający strumień plazmy wypływający dyszą z dużą prędkością na zewnątrz reaktora plazmowego. Regulacja parametrów elektrycznych, cieplnych i gazodynamicznych strumienia plazmy jest stosunkowo łatwa i może być prowadzona w szerokich granicach. Charakterystyczną cechą strumienia plazmy łuku stabilizowanego jest możliwość osiągnięcia bardzo dużych koncentracji energii i mocy sięgających 40 kW/cm^3 w stosunkowo niewielkiej przestrzeni.

Dotychczas opracowano wiele różnorodnych pod względem konstrukcyjnym i zasady działania reaktorów plazmy łukowej, zarówno prądu stałego jak i przemiennego [12]. Rozróżnia się dwa podstawowe typy plazmotronów: reaktory łukowe i indukcyjne generatory plazmy, zwane też plazmotronami wysokiej częstotliwości. Spośród plazmotronów łukowych w większym stopniu upowszechniły się urządzenia pracujące z prądem stałym. Łuk prądu stałego w porównaniu z łukiem prądu zmiennego charakteryzuje się bardziej ukierunkowanym rozkładem strumieni cieplnych oraz wyróżnia się lepszą stabilnością i sterowalnością a plazmotrony prądu stałego są zdecydowanie mniej zawodne w stosunku do tych pracujących przy prądzie przemiennym. W miarę doskonalenia konstrukcji plazmotronów otwierają się coraz to nowsze możliwości ich stosowania i opracowywane są coraz bardziej wyrafinowane technologie. Obecnie nagrzewanie plazmowo-łukowe zaliczane jest do jednych z najbardziej powszechnych metod nagrzewania elektrycznego.

Wykorzystywane w praktyce konstrukcje łukowych reaktorów plazmowych można podzielić na cztery zasadnicze grupy:

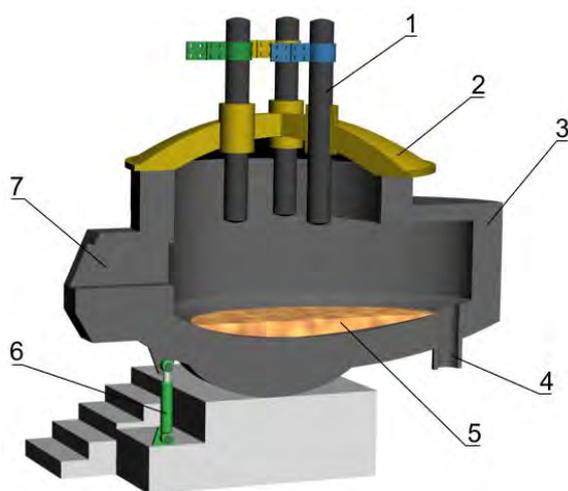
- piece plazmowo-łukowe,
- plazmotrony do cięcia i napyłania,
- plazmotrony strugowe,
- plazmotrony z łukiem ekspansyjnym.

W następnym rozdziale dokonano przeglądu konstrukcji reaktorów plazmowych, które są współcześnie rozwijane lub dają nadzieję na szybką implementację w technologiach high-tech, a w szczególności w przemyśle mikroelektronicznym do nanoszenia warstw

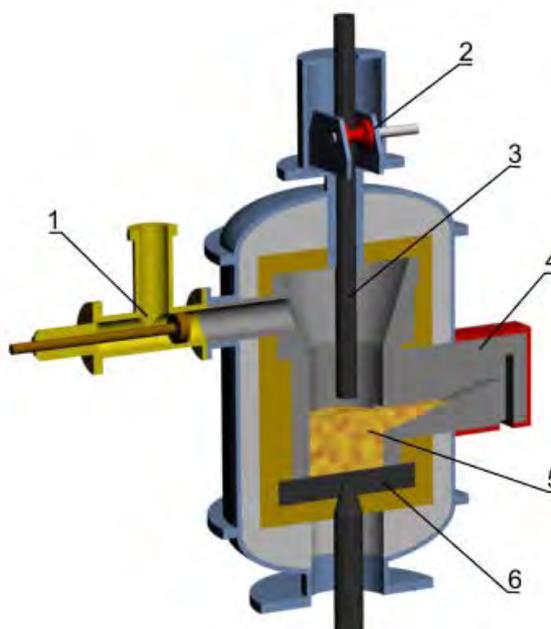
o wymaganych właściwościach, wytwarzaniu nowych materiałów, w tym nano- i biomateriałów, w obróbce powierzchniowej a także w technologiach plazmochemicznego oczyszczania gazów wylotowych, sterylizacji i dezynfekcji powietrza, wody, gleby i innych mediów. Szerzej omówiono reaktory z łukiem ekspansyjnym, do których zakwalifikowano reaktory ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, jako źródła nietermicznej plazmy generowanej przy ciśnieniu atmosferycznym, a które to mogą być zasilane z wykorzystaniem transformatorów o specjalnej konstrukcji, w tym o rdzeniach pięciokolumnowych.

2.1. Przegląd wybranych konstrukcji reaktorów plazmy łukowej

Znaczną grupę reaktorów plazmy łukowej stanowią piece plazmowo-łukowe przeznaczone do różnych celów metalurgicznych, spośród których wyróżnić można dwa podstawowe typy z grzaniem pośrednim i bezpośrednim. W piecach z grzaniem pośrednim łuk pali się między dwiema elektrodami bez kontaktu z wsadem pieca. Umożliwia to topienie materiałów elektrycznie nieprzewodzących, np. materiałów ceramicznych. W piecach z grzaniem bezpośrednim metalowy wsad pieca jest grzany łukiem elektrycznym palącym się między topionym wsadem a elektrodami.



Rys. 2.1. Schemat pieca stalowniczego prądu trójfazowego: 1 – elektrody, 2 – sklepienie, 3 – wana, 4 – otwór spustowy pieca, 5 – stopiony wsad pieca, 6 – mechanizm przechyłu pieca, 7 – okno wsadowe.



Rys. 2.2. Piec prądu stałego: 1 – mechanizm podawania materiału do wnętrza pieca, 2 – mechanizm podnoszenia elektrody, 3 – elektroda grafitowa, 4 – otwór spustowy pieca, 5 – stopiony wsad pieca, 6 – grafitowe dno pieca.

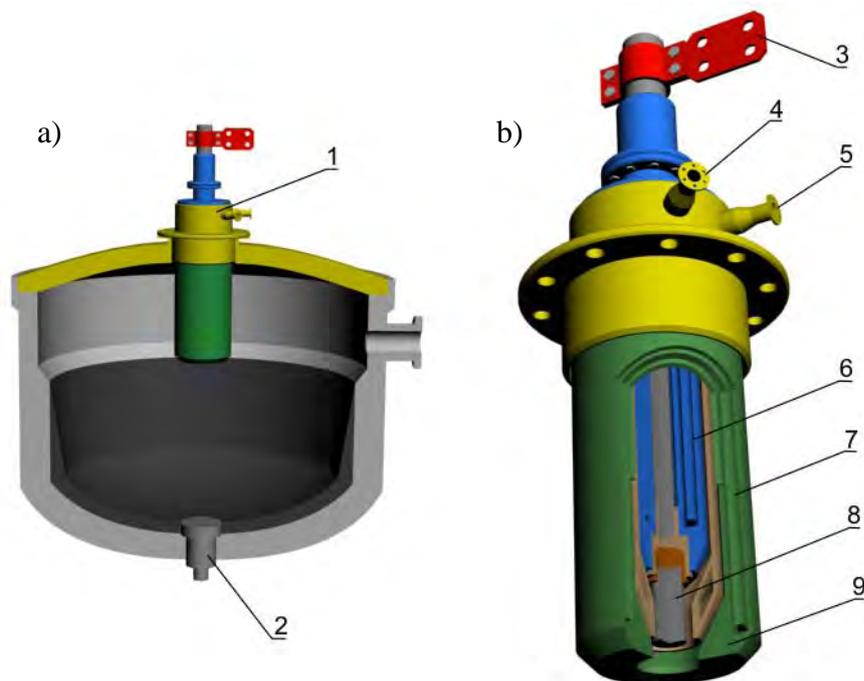
Na rysunku 2.1 przedstawiono schemat pieca łukowego do topienia stali w tradycyjnym wykonaniu. Piece łukowe przeznaczone do topienia stali stanowią obecnie jedne z największych odbiorników energii elektrycznej. Moce ich wynoszą 0,5-125 MVA przy napięciach dochodzących do 500 V. Duże piece łukowe są z reguły zasilane prądem zmiennym trójfazowym. Ciepło na topienie dostarczane jest do wsadu pieca głównie przez promieniowanie łuków, a przy łukach otulonych żużłem również przez przewodzenie. Zmiany mocy łuków dokonuje się przez zmianę wartości napięcia zasilania oraz zmianę prądów łuków. Kontrolę nad łukami sprawuje się za pomocą układów automatycznej regulacji [13], [14], [15], [16], między innymi położenia elektrod wewnątrz pieca. Stosowane w piecach łukowych elektrody muszą posiadać dobrą przewodność elektryczną, dostatecznie dużą wytrzymałość mechaniczną, odporność na utlenianie w wysokich temperaturach oraz mieć małą zawartość domieszek szkodliwych dla stali. Dlatego też najczęściej stosuje się elektrody z węgla bezpostaciowego lub elektrody grafitowe.

Od pewnego czasu duże zainteresowanie wzbudzają piece łukowe prądu stałego. Ich zalety, w porównaniu z trójfazowym piecem prądu przemiennego o podobnej wydajności wytapiania, to: lepsza współpraca pieca z siecią zasilającą, znacznie mniejsze zużycie elektrody grafitowej, bardziej stabilne płonienie łuku, uproszczona konstrukcja z jedną ruchomą elektrodą. Schemat poglądowy takiego pieca przedstawiono na rysunku 2.2 [17].

Do stalowniczych pieców łukowych prądu stałego zbliżone są pod względem budowy piece plazmowo-łukowe z tygłem ceramicznym. Umożliwiają one wyeliminowanie wielu wad stalowniczych pieców łukowych prądu przemiennego i mogą być wykorzystywane do produkcji wielu gatunków stali węglowych i specjalnych. W porównaniu z piecem łukowym w piecach plazmowo-łukowych, brak jest zużywalnych elektrod grafitowych. W piecach tych stosuje się specjalne plazmotrony do topienia pracujące z łukiem wewnętrznym i kontrolowane środowisko gazowe. Na rysunku 2.3 przedstawiono plazmotron do topienia umieszczony w sposób ruchomy w sklepieniu pieca. Typowa długość łuku w trakcie roztopiania wsadu zawiera się zwykle w granicach 0,8-1,5 m. Konstrukcja plazmotronu jest na tyle prosta, że w przypadku zużycia lub uszkodzenia dyszy bądź katody, są one wraz z całym kadłubem plazmotronu, zastępowane nowym.

Ciśnienie w piecach plazmowo-łukowych może wahać się w szerokich granicach. Niskie ciśnienie ograniczone jest potrzebą zachowania stanu ściśnięcia łuku oraz jego stabilnością. Wysokie ciśnienie pozwala na otrzymywanie stali naazotowanej. Obecnie

duże znaczenie przemysłowe mają piece plazmowo-próżniowe. W technologii tej próżnia spełnia przede wszystkim funkcje ochronne i pozwala na topienie oraz przeróbkę czystych i wysoko reakcyjnych materiałów. Chroni ona materiały aktywne chemicznie przed zanieczyszczeniem podczas obróbki drogą nagrzewania. Poza tym, próżnia jako czynnik technologiczny pozwala na oczyszczanie materiałów ze szkodliwych domieszek.



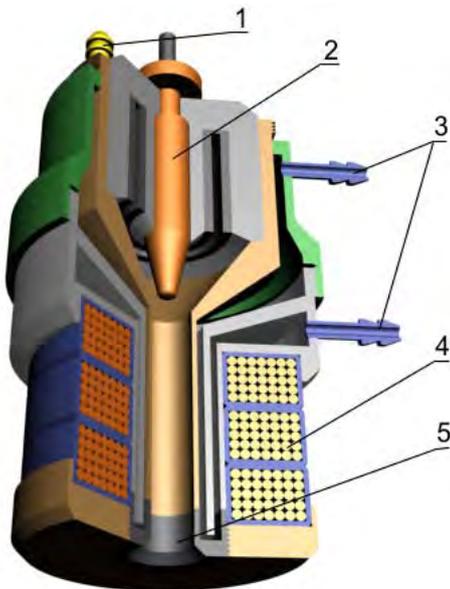
Rys. 2.3. Stalowniczy piec plazmowo-łukowy [18]: a) schemat poglądowy pieca: 1 – plazmotron, 2 – elektroda trzonowa, b) schemat konstrukcji plazmotronu do topienia: 3 – doprowadzenie prądowe, 4 – zasilanie gazem plazmotwórczym, 5 – zasilanie gazem osłonowym, 6 – uchwyt katodowy chłodzony wodą, 7 – płaszcz chłodzony wodą, 8 – katoda niezużywalna, 9 – dysza.

W odlewniczych urządzeniach plazmowo-próżniowych można uzyskiwać super cienkie taśmy metalowe, dokonywać odlewów kształtowych z najróżniejszych metali i ich stopów np. odlewanie kształtowe z tytanu oraz jego dyspergowanie.

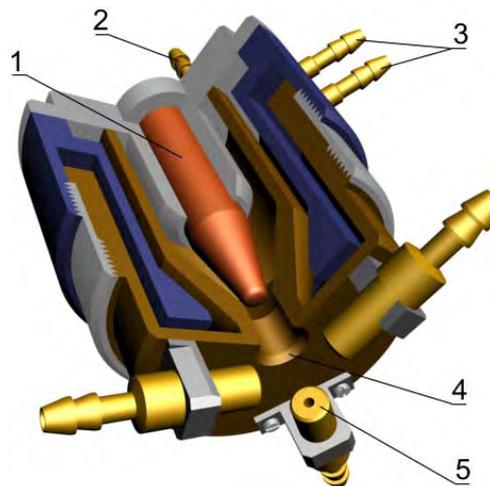
Do obróbki materiałów stosowane są palniki plazmowe. W zależności od przewodności elektrycznej poddawanego obróbce materiału, stosowane są dwa rodzaje palników: z łukiem wewnętrznym lub łukiem przerzuconym [19]. W pierwszym przypadku łuk pali się pomiędzy katodą a anodą, przez którą gaz roboczy wypływa na zewnątrz palnika w postaci strumienia plazmy. W drugim przypadku łuk pali się pomiędzy katodą a pracującym jako anoda materiałem obrabianym.

Przykładową konstrukcję palnika plazmowego przedstawia rysunek 2.4. W reaktorze łuk pali się między katodą w postaci pręta a anodą pełniącą równocześnie rolę dyszy. Doprowadzany do komory wyładowczej gaz roboczy ulega w niej zawirowaniu

i wpływając do wnętrza anody porywa za sobą kolumnę łukową. Utrzymująca się między ścianką dyszy a kolumną łukową warstwa chłodnego gazu chroni termicznie anodę oraz stabilizuje wyładowanie w osi kanału, dodatkowo je ściskając. Przechodzący przez kolumnę łukową gaz nagrzewa się do temperatury kilkudziesięciu tysięcy stopni a w wyniku skurczu termicznego gęstość prądu w kolumnie łuku dochodzi do 100 A/mm^2 .



Rys. 2.4. Plazmotron do cięcia plazmowego materiałów nie tylko metalicznych: 1 – zasilanie gazem plazmotwórczym, 2 – katoda, 3 – obieg wody chłodzącej, 4 – solenoid, 5 – anoda.



Rys. 2.5. Plazmotron do napyłniania: 1 – katoda, 2 – zasilanie gazem plazmotwórczym, 3 – obieg wody chłodzącej, 4 – anoda, 5 – dysza podawania materiału napyłnianego.

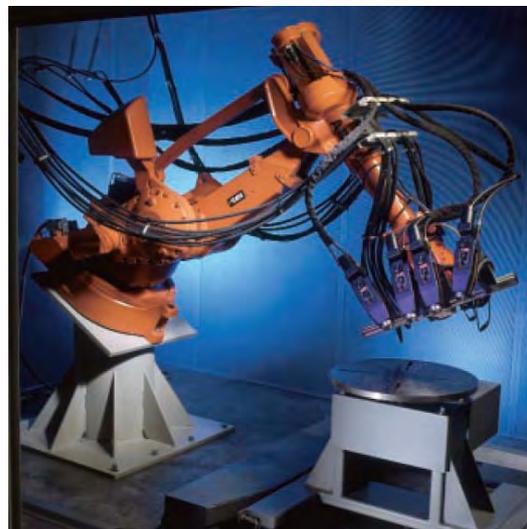
Podobną budowę do palników plazmowych mają plazmotrony do napyłniania warstw (rys. 2.5), z tą różnicą, że w plazmotronach do napyłniania proszków wirowanie łuku nie może być stosowane. Obecność składowej kołowej prędkości gazu prowadziłaby do rozrzutu napyłnianego materiału. Napyłniany materiał może być podawany w postaci proszku lub pręta [20], [21]. Stosowanie proszku pozwala na lepsze wykorzystanie energii cieplnej plazmy, jednakże stwarza problemy technologiczne związane ze stabilnością pracy urządzenia plazmowego. Plazmotrony z materiałem podawanym w postaci pręta pozwalają uzyskiwać wyższej jakości pokrycia, jednak ze względu na złożoność procesu nie znalazły szerszego zastosowania.

Wygląd produkowanego komercyjnie plazmotronu do napyłniania przedstawiono na rysunku 2.6. Współcześnie, technologia cięcia plazmowego oraz technologia plazmowego napyłniania warstw są, kolejnymi po piecach plazmowych, najlepiej rozwiniętymi technologiami plazmowymi. Aby zapewnić uzyskiwanie powłok o wysokich

i powtarzalnych parametrach dąży się do automatycznego sterowania procesem natryskiwania z tendencją do eliminowania obsługi. Na rysunku 2.7 przedstawiony jest robot przemysłowy służący do plazmowego napyłania warstw.



Rys. 2.6. Plazmotron do napyłania [22].



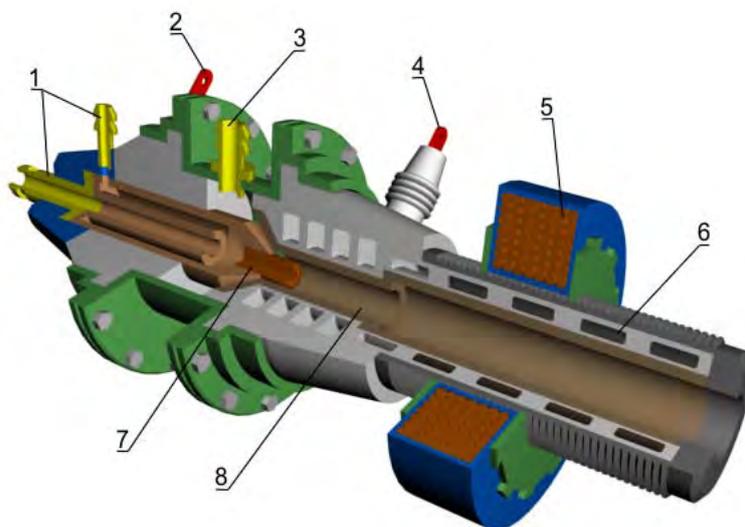
Rys. 2.7. Robot przemysłowy do plazmowego nanoszenia warstw [23].

Stosowanie plazmy niskotemperaturowej umożliwia nanoszenie powłok praktycznie ze wszystkich materiałów trwałych w temperaturze topnienia, w tym ze związków o cennych właściwościach fizykochemicznych, jak węgliki, borki, azotki i cermetale. Wyjątkiem są materiały, które w czasie podgrzewania nie mają fazy ciekłej i sublimują lub też ulegają rozkładowi chemicznemu w wyższych temperaturach. Uzyskane metodą napyłania plazmowego powłoki charakteryzują się wysoką jakością pod względem gęstości, porowatości, przyczepności do podłoża. Podwyższają izolację cieplną i elektryczną a także odporność na erozję mechaniczną i chemiczną oraz zapewniają żaroodporność [24], [25]. Cenną cechą technologii plazmowego nanoszenia powłok jest łatwość regulacji parametrów nanoszonej powłoki oraz nieznaczne przegrzewanie podłoża. Ciągła modernizacja urządzeń do natryskiwania plazmowego ma na celu uzyskanie większej koncentracji strumienia plazmy, zwiększenie energii tego strumienia oraz uzyskania wyższych temperatur [26].

Uniwersalnym źródłem ciepła dla różnych technologii są plazmotrony strugowe. Wykorzystuje się je do nagrzewania strugi gazowej do wysokich temperatur z zakresu od 2000 K do 5000 K i więcej. Cechą wspólną plazmotronów strugowych jest możliwość przestrzennej stabilizacji płonienia łuku w intensywnym strumieniu gazu. W łuku

swobodnym, ze wzrostem natężenia prądu, powiększa się przekrój poprzeczny kolumny łukowej, w efekcie nie następuje wzrost gęstości prądu, i temperatury plazmy. W takim łuku, maksymalne temperatury nie przekraczają 10 000 K. Przez zwężenie średnicy kolumny łukowej można osiągnąć zwiększenie gęstości prądu, a tym samym uzyskać temperatury przekraczające 10 000 K. Ograniczenia powierzchni poprzecznej łuku dokonuje się bądź przez omywanie kolumny łukowej warstwą zimnego gazu bądź zewnętrznym polem magnetycznym, usytuowanym wokół kolumny łukowej. Poprzez omywanie kolumny łukowej wymuszonym strumieniem gazu osiąga się lepszą sterowalność parametrów łuku. Poprawie ulega również sam proces nagrzewania poprzez zwiększenie temperatury łuku oraz polepsza się współczynnik przejmowania ciepła z jego powierzchni.

Plazmotrony strugowe w zależności od geometrii i rozmieszczenia przestrzennego elektrod dzielone są na dwa typy: plazmotrony strugowe z uskokiem oraz z wstawką międzyelektrodową. Należą one do najbardziej podstawowych i perspektywicznych urządzeń elektrotermicznych w technologii strugowej. Na rysunku 2.8 przedstawiony jest plazmotron strugowy prądu stałego.



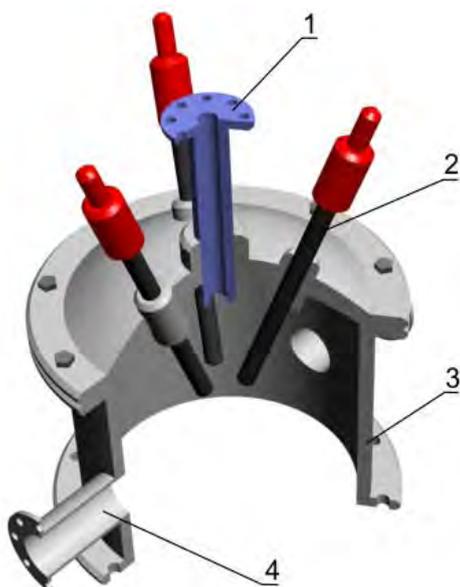
Rys. 2.8. Schemat osiowego plazmotronu prądu stałego: 1 – obieg wody chłodzącej, 2 – zasilanie katody, 3 – napływ gazu plazmotwórczego, 4 – zasilanie anody, 5 – solenoid lub magnes trwały, 6 – kanały cieczy chłodzącej, 7 – katoda, 8 – anoda.

W plazmotronach strugowych stabilność łuku znacznie wzrasta, jeśli strumień gazu wiruje względem osi komory łukowej. W wyniku tego rozrzedzony, nagrany gaz skupia się wzdłuż osi komory łukowej, a zimniejsze warstwy gazu przesuwają się ku jej ścianom. W efekcie łuk stara się zająć położenie w pobliżu osi komory, odsuwając się od jej chłodnych ścianek. Dla uzyskania przepływu wirowego gazu stosuje się w urządzeniu

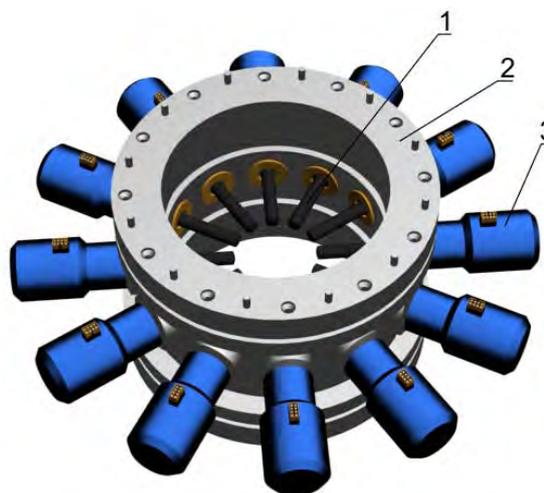
odpowiednio ukształtowaną komorę wirową, poprzez którą wprowadza się strumień gazu do komory łukowej.

2.2. Plazmotrony z łukiem ekspansyjnym

Reaktory plazmowe prądu przemiennego z łukiem ekspansyjnym, jako źródła nietermicznej i nierównowagowej plazmy, generowanej przy ciśnieniu atmosferycznym cieszą się ostatnio dużym zainteresowaniem przemysłu i nauki [27]. Przedstawiony na rysunku 2.9 [28] reaktor plazmowy umożliwia prowadzenie badań nad przemysłowym wykorzystaniem plazmy powstałej w trójfazowym wyładowaniu łukowym do rozbijania węgłowodoru na sadzę i wodór.



Rys. 2.9. Reaktor trójelektrodowy: 1 – dysza wlotowa gazu plazmotwórczego, 2 – elektroda grafitowa, 3 – komora wyładowcza, 4 – kanał wlotowy czynnika poddawanej obróbce plazmowej.



Rys. 2.10. Schemat poglądowy konstrukcji dwunastoelektrodowego reaktora plazmowego: 1 – elektrody grafitowe, 2 – komora wyładowcza, 3 – układ automatycznej regulacji długości elektrod.

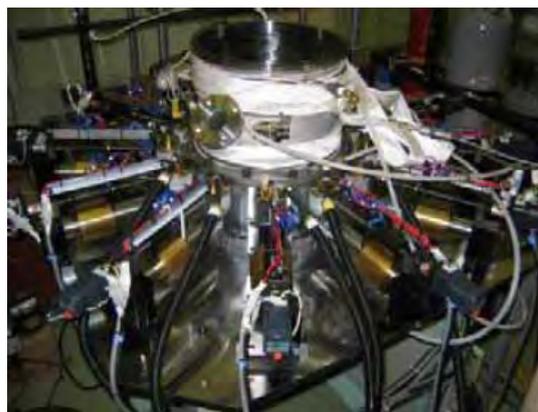
Rozkład temperatury wewnątrz komory wyładowczej jest nierównomierny. W reaktorze o mocy 100 kW, w bezpośrednim sąsiedztwie wyładowania, odnotowuje się temperatury bliskie 7 000 K, zaś na końcu komory wyładowczej temperatura osiąga około 1 000 K. Pionowe umieszczenie grafitowych elektrod oraz wymuszony nadmuch gazu plazmotwórczego, skierowany na wyładowanie od góry, zapobiegają osadzaniu się sadzy na elementach konstrukcyjnych reaktora. Nadmierne jej nagromadzenie w obszarze międzyelektrodowym mogłoby doprowadzić do zwarcia elektrod i w konsekwencji do zgaszenia wyładowania.

Przedstawiony na rysunku 2.10 dwunastoelektrodowy reaktor plazmowy przeznaczony jest do syntezy nanorurek węglowych [29]. Proces technologiczny w tym reaktorze prowadzony jest w atmosferze helu pod ciśnieniem 600 mmHg, a wyładowanie łukowe zachodzi przy napięciu 20-45 V i prądzie 70-100 A. W takich warunkach na stalowej płycie umieszczonej we wnętrzu komory wyładowczej można otrzymać warstwy nanorurek o średnicach 20-40 nm. Zastosowanie dwunastu elektrod pozwala na bardziej równomierne wypełnienie komory wyładowczej plazmą w porównaniu z reaktorami o mniejszej ich liczbie. Tym samym osiąga się równomierne nagrzanie materiału, na którym osadzają się nanorurki.

Zdjęcie wnętrza komory wyładowczej podczas pracy reaktora przedstawia rysunek 2.11. Elektrody w reaktorze wykonane są z materiału, którego 99,9 % objętości stanowi czysty grafit, w postaci okrągłych prętów. Układy automatyki i ich rozmieszczenie wokół komory wyładowczej reaktora przedstawia zdjęcie z rysunku 2.12.

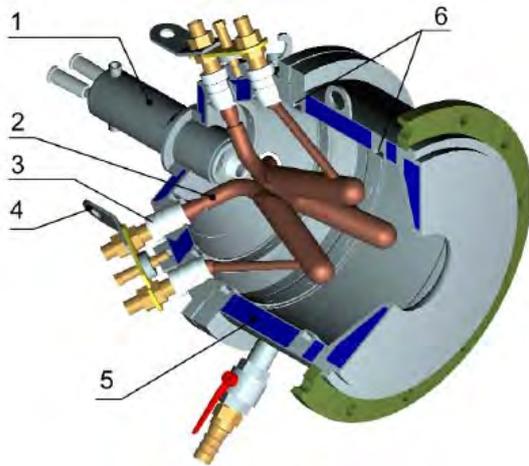


Rys. 2.11. Wnętrze komory wyładowczej dwunastoelektrodowego reaktora plazmowego [29].

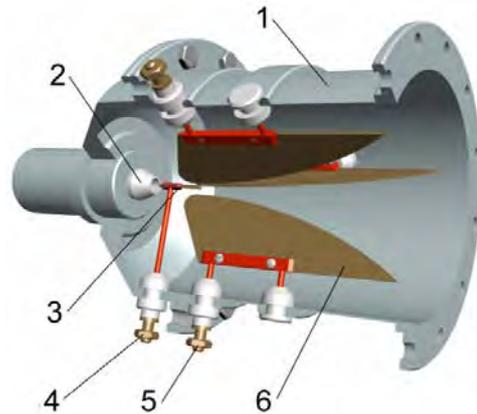


Rys. 2.12. Zdjęcie układów automatyki dwunastoelektrodowego reaktora plazmowego [29].

Innym rodzajem reaktorów plazmowych z łukiem ekspansyjnym są plazmotrony ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, przedstawione na rysunkach 2.13 i 2.14. Ślizgające się wyładowanie łukowe (z ang. „gliding arc discharge”), zwane także pod technologiczną nazwą GlidArc, jako źródło nietermicznej plazmy, generowanej przy ciśnieniu atmosferycznym zostało zaproponowane przez Czernichowskiego i zespół z Laboratorium Fizyki Plazmy Uniwersytetu w Orleanie, we Francji w 1990r. [30]. Jego główną cechą jest możliwość generacji nietermicznej plazmy bezpośrednio w zanieczyszczonym gazie, przy ciśnieniu atmosferycznym i w warunkach, w jakich gazy wylotowe są emitowane do atmosfery, bez konieczności ich wstępnej obróbki.



Rys. 2.13. Trójfazowy reaktor plazmowy [31]: 1 – jednofazowy reaktor plazmowy, 2 – elektroda robocza, 3 – materiał izolujący, 4 – zacisk zasilania, 5 – obieg wody chłodzącej, 6 – kanały dostarczania gazu.



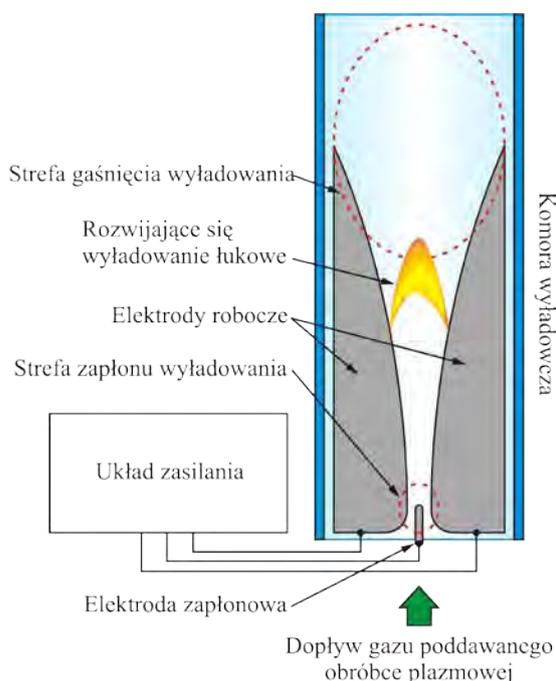
Rys. 2.14. Trójfazowy reaktor plazmowy z dodatkową elektrodą zapłonową: 1 – komora wyładowcza, 2 – dysza wlotu gazu, 3, 4 – elektroda zapłonowa z zasilaniem, 5, 6 – elektroda robocza z zasilaniem.

Plazmę ślizgającego się wyładowania łukowego można generować przy napięciu stałym, przemiennym i impulsowym. Stosowane w przemyśle plazmotrony ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym są budowane jako dwu-, trzy- i wieloelektrodowe i często posiadają dodatkową elektrodę zapłonową.

Przedstawiony na rysunku 2.13 reaktor plazmowy wytwarza trójfazowe wyładowanie łukowe o mocy dochodzącej do 500 kW [31]. Zastosowane chłodzenie wodne elektrod i komory wyładowczej umożliwia stosowanie w konstrukcji reaktora łatwo topliwych materiałów. Dodatkowo szybki ruch punktów przyczepienia łuków wzdłuż elektrod pod wpływem sił elektrodynamicznych i gazodynamicznych nie powoduje miejscowego rozgrzewania elektrod. W efekcie, w konstrukcji reaktora można stosować łatwo topliwe materiały odporne na substancje agresywne, co zwiększa zakres jego zastosowań. Elementem inicjującym wyładowanie jest wtryskiwacz plazmy zasilany napięciem jednofazowym. Jest to niewielkiej mocy reaktor plazmowy wytwarzający strumień plazmy o koncentracji elektronów $n_e=10^{13}-10^{14} \text{ cm}^{-3}$ skierowany do obszaru, w którym odległość pomiędzy elektrodami roboczymi jest najmniejsza. Taka koncentracja elektronów w strefie zapłonu wyładowania umożliwia pewny zapłon łuku elektrycznego na elektrodach roboczych.

Najprostszy konstrukcyjnie jest dwuelektrodowy reaktor plazmowy ze ślizgającym się łukiem, którego geometrię przedstawiono na rysunku 2.15 [32]. Reaktor składa się z dwóch elektrod roboczych umieszczonych w komorze wyładowczej, przez którą

przepływa z odpowiednią prędkością (>10 m/s) zanieczyszczony gaz, poddawany obróbce plazmowej. Na rys. 2.16 przedstawiono widok płonącego łuku w tego typu reaktorze.



Rys. 2.15. Idea konstrukcji 2-elektrodowego reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.



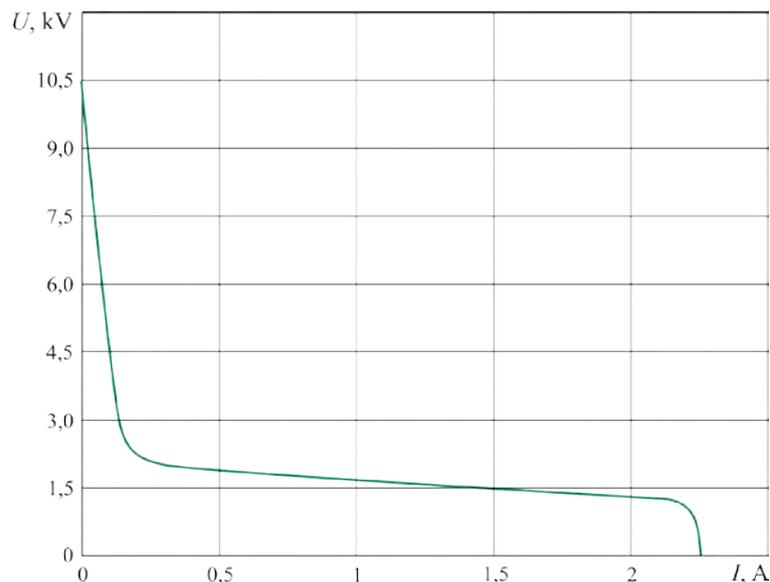
Rys. 2.16. Ślizgające się wyładowanie łukowe.

Aby zapewnić odpowiednie, nierównowagowe i nietermiczne warunki generowanej plazmy, napięcie zasilające powinno mieć wartość od 1-2 kV, podczas gdy prąd pary elektrod nie powinien przekraczać 10 A. Takie wartości prądu i napięcia nie są typowe dla wyładowania łukowego, a raczej dla jarzeniowego, generowanego zwykle przy ciśnieniach znacznie niższych od atmosferycznego. Ponadto wymagane dla utrzymania wyładowania napięcie między elektrodami roboczymi ma niewystarczającą wartość do zapłonu wyładowań w każdym następnym cyklu pracy reaktora i dlatego do przestrzeni międzyelektrodowej, w tak zwanej strefie zapłonu, wprowadza się dodatkową elektrodę zapłonową.

Ze względu na małą odległość elektrod w strefie zapłonu, zwykle 1-4 mm, warstwy przyelektrodowe stykają się ze sobą i występuje łuk krótki, w którym praktycznie nie obserwuje się kolumny łukowej. Duże obciążenia cieplne w rejonie strefy zapłonu może powodować erozję elektrod. Można założyć, że w miejscu zapłonu, wyładowanie znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej. Pod wpływem sił elektro- i gazodynamicznych wyładowanie przesuwa się wzdłuż elektrod i jest podtrzymywane przy znacznie niższym

napięciu niż wymagane do zapłonu. Towarzyszy temu kilkukrotny wzrost długości i objętości wyładowania, które ma cechy łuku długiego. Równocześnie następuje obniżenie temperatury ośrodka gazowego wewnątrz kolumny łukowej i przejście do fazy nierównowagowej. Zgaśnięcie wyładowania następuje z chwilą, gdy energia elektryczna dostarczana ze źródła zasilania nie jest w stanie zrównoważyć strat energetycznych wydłużającej się kolumny łukowej. Obszar, w którym następuje zgaśnięcie wyładowania, określa się mianem strefy gaśnięcia. Po zgaśnięciu wyładowania, następuje niemal natychmiastowa jego odbudowa w strefie zapłonu i cykl pracy reaktora powtarza się. Na czas trwania jednego cyklu ma wpływ wiele czynników, spośród których należy wymienić takie, jak: wymiary i kształt elektrod, prędkość przepływu ośrodka gazowego przez komorę wyładowczą, temperatura panująca wewnątrz komory wyładowczej, skład chemiczny gazu, napięcie i prąd elektrod oraz częstotliwość napięcia zasilającego.

Z przedstawionej na rysunku 2.17 statycznej charakterystyki napięciowo-prądowej wynika, że napięcie zapłonu wyładowań (10,5 kV) ma wartość ponad sześciokrotnie większą od wymaganego do ich podtrzymania (1,5 kV) przy nominalnym prądzie elektrod wynoszącym 1,5 A.



Rys. 2 17. Typowa charakterystyka statyczna napięciowo-prądowa ślizgającego się łuku.

Zwiększenie liczby elektrod w reaktorze plazmowym pozwala na wytworzenie obszaru plazmy o większej objętości, wypełniającego znaczną część komory wyładowczej reaktora. Stosuje się więc układy wieloelektrodowe lub połączenia kilku reaktorów szeregowo dla przepływającego gazu.

W rozdziale 3 przedstawiono obszerne badania charakterystyk statycznych i dynamicznych trójfazowego reaktora plazmowego dla różnych gazów plazmotwórczych oraz różnych parametrów układu zasilania, zwracając szczególną uwagę na zjawiska związane z paleniem się łuku w układzie trójfazowym. Takie badania i charakterystyki są niezbędne, aby podać wymagania, jakie muszą spełniać układy zasilania tych nietypowych odbiorników energii elektrycznej oraz aby móc poprawnie projektować sprawne i niezawodne systemy generacji nietermicznej plazmy ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

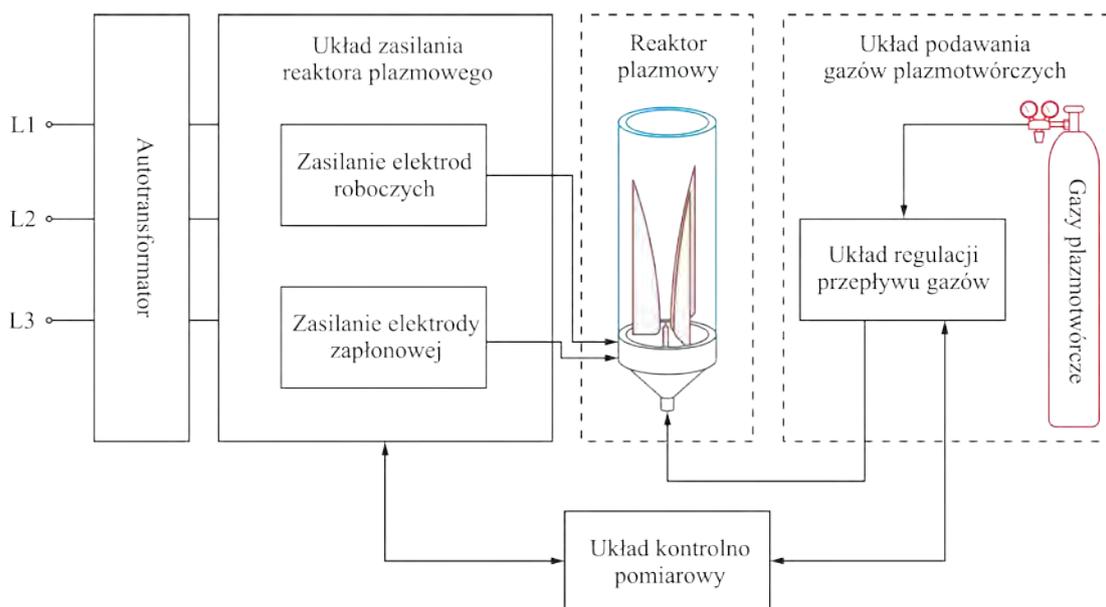
3. Charakterystyki trójfazowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem

Charakterystyki reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem różnią się od tych jakie prezentują reaktory z innymi rodzajami wyładowań elektrycznych. Rezystancja przestrzeni międzyelektrodowej, która zależy od stopnia jonizacji gazu, zmienia się istotnie podczas każdego cyklu pracy reaktora i jest największa przed zapłonem, gdy gaz nie jest zjonizowany. Po zapłonie gwałtownie maleje i następnie ponownie rośnie, wraz z rozwijającym się łukiem, aż do zgaśnięcia wyładowania w miejscu największego odstępów elektrod. Charakterystyki statyczne i dynamiczne reaktora plazmowego zależą od wielu czynników, które zaliczyć można do trzech głównych grup związanych z:

- geometrią reaktora plazmowego,
- układem dostarczania gazów roboczych,
- układem zasilania w energię elektryczną.

Poprzez zmianę geometrii reaktora, składu gazu roboczego oraz parametrów zasilania można wpływać na parametry elektryczne i termiczne wyładowania w komorze wyładowczej reaktora plazmowego. Wpływając na moc wyładowania, temperaturę generowanej plazmy, stopień jonizacji gazu, skład chemiczny atmosfery można, z kolei, kształtować parametry technologiczne prowadzonego procesu plazmowego.

Przedstawione w rozdziale wyniki badań i analizy przeprowadzono dla trójfazowego reaktora plazmowego z dodatkową elektrodą zapłonową. Schemat blokowy układu, w którym przeprowadzono badania, przedstawia rysunek 3.1 a dane techniczne badanego reaktora plazmowego zebrano w tablicy 1.



Rys. 3.1. Schemat blokowy układu zasilania, kontroli i pomiarów trójfazowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

Tablica 1. Parametry konstrukcyjne trójfazowego reaktora plazmowego.

Materiał elektrody zapłonowej	wolfram
Materiał elektrod roboczych	stal kwasoodporna 0H18N9
Długość elektrody zapłonowej	15 mm
Średnica elektrody zapłonowej	0,8 mm
Długość elektrod roboczych	141 mm
Odległość elektrody roboczej o osi komory wyładowczej zapłonu	1 – 6 mm w strefie zapłonu (regulowana)
	30 – 35 mm w strefie gaśnięcia (regulowana)
Zakres regulacji przepływu gazu przez dyszę reaktora	0 – 9 m ³ /h
Średnica dyszy wlotowej	3 mm
Średnica komory wyładowczej	80 mm

Instalacja gazowa składa się z zestawu regulatorów przepływu Bronkhorst o symbolu F-202AV-AAD-44-V oraz kasety z ich elektronicznymi układami sterowania E-7400-10-01-01-AAA. Taka konfiguracja pozwala na regulację przepływu gazów w zakresie od 0 do 15 metrów sześciennych na godzinę (m³/h). W badanym reaktorze maksymalny przepływ nie przekraczał 9 m³/h, ze względu na ograniczoną przepustowość dyszy. Dysza jest tak ukształtowana, aby gaz dostawał się bezpośrednio do przestrzeni międzyelektrodowej i dopiero tam następowało jego rozprężanie.

Charakterystyki reaktora plazmowego zostały zdjęte przy zasilaniu z układu trzech transformatorów jednofazowych i niezależnego układu zasilającego elektrodę zapłonową.

Badania wpływu częstotliwości na ślizgające się wyładowanie łukowe przeprowadzono przy zasilaniu reaktora z przekształtnika tyrystorowego AC/DC/AC [33]. Napięcie strony pierwotnej transformatorów zasilających we wszystkich przypadkach regulowano za pomocą autotransformatora. Wykorzystany do badań układ zasilania umożliwia pomiary charakterystyk reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem dla różnych wartości napięcia zasilającego, jego częstotliwości oraz mocy wyładowania. Dane techniczne układu zasilania przedstawia tablica 2.

Tablica 2. Dane techniczne układu zasilania.

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

Łukowe reaktory plazmowe stosowane w procesach plazmowej obróbki toksycznych gazów emitowanych do atmosfery nie zostały do chwili obecnej uszeregowane pod względem stosowanych mocy jednostkowych, napięć i prądów. Nie istnieją też ogólne wytyczne do projektowania ich układów zasilania. Podstawową trudnością uogólnienia charakterystyk eksperymentalnych reaktorów plazmowych jest niewielka liczba wiarygodnych i pełnych danych eksperymentalnych w literaturze naukowo-technicznej. Dotychczasowe doświadczenia pozwalają określić zakres parametrów zasilania

zapewniający korzystną pracę reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym [34], [35].

Dla trójfazowych reaktorów plazmowych z elektrodą zapłonową można określić następujący zakres parametrów zasilania:

- napięcie elektrod roboczych: 1 – 4 kV,
- prąd elektrod roboczych: 1 – 5 A,
- częstotliwość napięcia zasilającego: 0 – 50 Hz
- napięcie elektrody zapłonowej: 10 – 15 kV,
- częstotliwość napięcia zapłonu: 50 Hz – 40 kHz
- prąd elektrody zapłonowej: 20 – 50 mA.

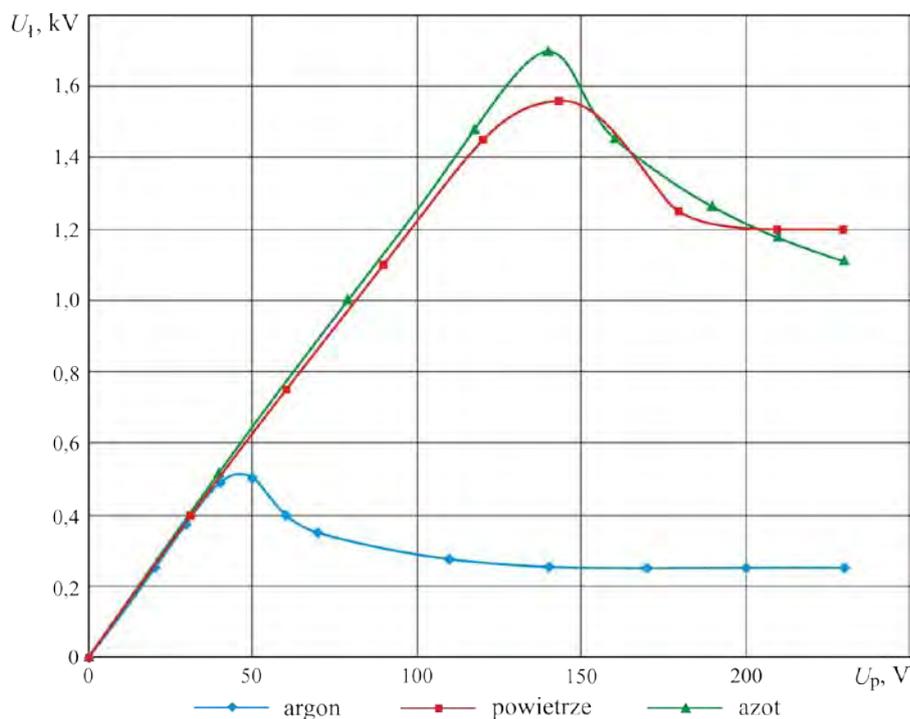
Aby wyznaczyć parametry układu zasilania reaktorów plazmowych, należy uwzględnić szereg zjawisk, jakie zachodzą w trakcie ich pracy i mogą istotnie wpływać na stabilność wyładowań oraz nierównowagowe warunki generowanej wyładowaniem łukowym plazmy. Należy zatem brać pod uwagę, że:

- wytrzymałość dielektryczna na przebicie gazu znajdującego się wewnątrz komory wyładowczej zależy od jego rodzaju i składu,
- wytrzymałość dielektryczna gazu poddawanego obróbce plazmowej ulega w czasie jej trwania znacznym zmianom na skutek rozbijania wiązań chemicznych i tworzenia się nowych związków,
- erozja elektrod może powodować zmiany parametrów energetycznych reaktora plazmowego, a produkty erozji elektrod zanieczyszczają środowisko plazmowo-gazowe wewnątrz komory wyładowczej.

Wymienione czynniki mogą wpływać na charakterystyki statyczne i dynamiczne reaktora plazmowego, przy czym zmiany tych charakterystyk mogą być rozciągnięte w czasie i mieć charakter zmian stałych lub następować skokowo w krótkich odstępach czasowych. Charakterystyki trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową przedstawiono na rysunkach od 3.2 do 3.10. Pomiary wykonano dla trzech gazów plazmotwórczych: argonu, azotu i powietrza przy przepływie przez dyszę plazmotronu wynoszącym 1 m³/h.

Projektując układ zasilania należy określić minimalną wartość napięcia, które podtrzyma wyładowanie łukowe między elektrodami roboczymi reaktora plazmowego. Jego wartość można odczytać z charakterystyki zmian napięcia mierzonego na elektrodach roboczych reaktora (napięcia ślizgającego łuku) w funkcji zmian napięcia strony

pierwotnej transformatorów. Charakterystykę tę dla różnych gazów plazmotwórczych przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Charakterystyka napięcia łuku U_l w funkcji zmian napięcia U_p strony pierwotnej transformatorów zasilających.

Z charakterystyki 3.2 wynika, że mimo stosowania elektrody zapłonowej, na której nieprzerwanie pali się wyładowanie elektryczne podtrzymywane napięciem 15 kV o częstotliwości 20 kHz, konieczne jest zasilanie elektrod roboczych napięciem o wartości wyższej niż jest wymagana do stabilnej pracy reaktora plazmowego. Wartość napięcia zapłonu wyładowania trójfazowego na elektrodach roboczych badanego reaktora plazmowego wynosi 1550 V w przypadku wyładowania w powietrzu, 1700 V w atmosferze azotu i zaledwie 500 V w atmosferze argonu.

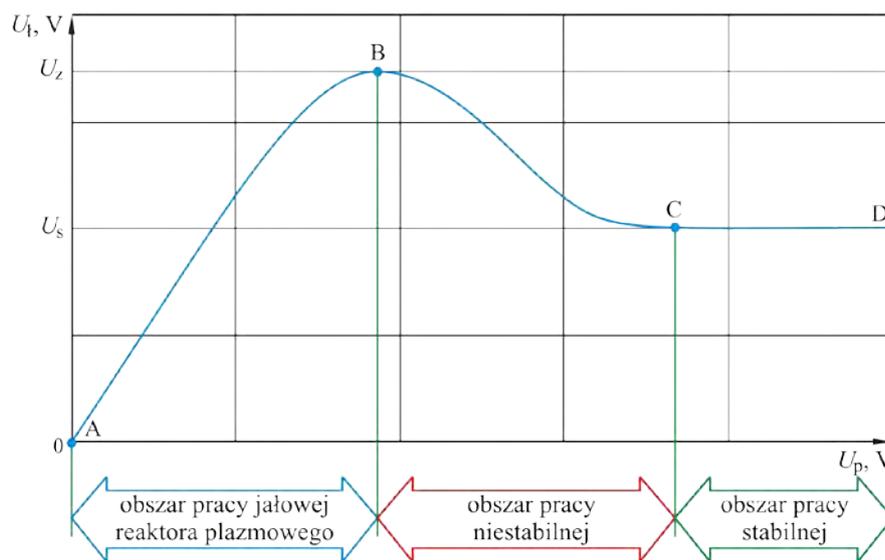
Tablica 3. Napięcie zapłonu wyładowania i stabilnej pracy reaktora dla różnych gazów plazmotwórczych.

Napięcie zapłonu wyładowania			Napięcie stabilnej pracy reaktora		
Argon	Azot	Powietrze	Argon	Azot	Powietrze
500 V	1700 V	1550 V	250 V	1100 V	1200 V

Po wystąpieniu zapłonu wyładowania, mimo dalszego wzrostu napięcia strony pierwotnej transformatorów zasilających, napięcie łuku początkowo spada a następnie

uzyskuje stałą wartość. Wartość napięcia, jaka się ustali, zależy od składu chemicznego atmosfery w jakiej zachodzi wyładowanie i wynosi 1200 V dla powietrza, 1100 V dla azotu i 250 V dla argonu. Wartości zmierzonych napięć zebrano w tabelicy 3.

Na podstawie przebiegu charakterystyk napięciowych przedstawionych na rysunku 3.2 można wyznaczyć obszary stabilnej i niestabilnej pracy reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.



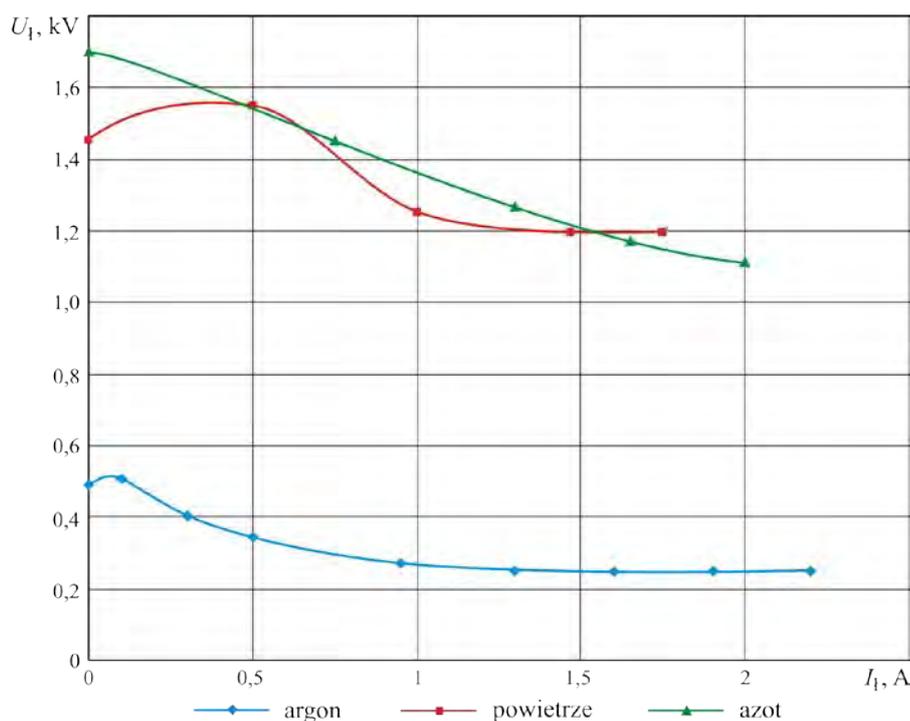
Rys. 3.3. Ilustracja obszarów stabilnej i niestabilnej pracy trójfazowego reaktora plazmowego; U_z – napięcie zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych, U_s – napięcie stabilnej pracy.

Zgodnie z rysunkiem 3.3, w części narastającej charakterystyki napięciowej, zawierającej się między punktami A i B, nie występuje wyładowanie elektryczne pomiędzy elektrodami roboczymi reaktora plazmowego a układ zasilania znajduje się w stanie jałowym pracy. W punkcie B charakterystyka osiąga wartość maksymalną, a tym samym napięcie zasilające elektrody robocze uzyskuje wartość wymaganą do przebicia zjonizowanej przestrzeni między elektrodami roboczymi. Między punktami B i C rozciąga się obszar niestabilnej pracy reaktora plazmowego. W obszarze tym wyładowanie pali się niestabilnie, co w obwodzie zasilania objawia się częstymi przerwami bezprądowymi o niejednakowych czasach trwania. Stabilna praca reaktora plazmowego zaczyna się w punkcie C charakterystyki napięciowej i rozciąga się na całą jej część prostoliniową aż do punktu D.

Z przedstawionych na rysunku 3.2 i 3.3 charakterystyk wynika, że projektując układ zasilania reaktora plazmowego, należy uwzględnić potrzebną do zapłonu wyładowania nadwyżkę napięcia. W przypadku zasilania elektrod roboczych reaktora, pracującego

w atmosferze argonu nadwyżka ta musi wynosić około 100 % wartości napięcia, przy której reaktor pracuje stabilnie. Mniejsze różnice między wartością napięcia zapłonu wyładowania a napięciem pracy stabilnej reaktora plazmowego występują dla gazów plazmotwórczych zawierających duże stężenia azotu. Dla czystego azotu, napięcie zapłonu wyładowania w reaktorze jest większe o około 55 %, zaś dla powietrza o około 30 %, od napięcia, przy którym reaktor pracuje stabilnie.

Opadające charakterystyki reaktora plazmowego wskazują, że najkorzystniejsze do zasilania jest źródło o takiej właśnie charakterystyce. Zaletą takiego źródła jest również możliwość pracy przy prądach równych w przybliżeniu prądom zwarcia. Cechy te łączą w sobie coraz bardziej popularne w układach zasilania reaktorów plazmowych prostowniki tyrystorowe. Pozwalają one na bardzo szeroką regulację napięcia i prądu, a przez to na dostosowanie źródła do wymogów procesu plazmowego i zapewnienie pożądanych parametrów plazmy. Opadające charakterystyki zewnętrzne źródła zasilania można również osiągnąć przez odpowiednie zaprojektowanie transformatorów zasilających reaktor plazmowy. W praktyce, oznacza to konieczność kształtowania uzwojeń transformatora i takiego ich rozmieszczenia na rdzeniu, by uzyskać wymaganą wartość reaktancji rozproszenia. Zbyt duża jej wartość znacznie ograniczy moc wyładowania palącego się w reaktorze plazmowym, a zbyt mała będzie przekładać się na nieefektywne wykorzystanie transformatora.

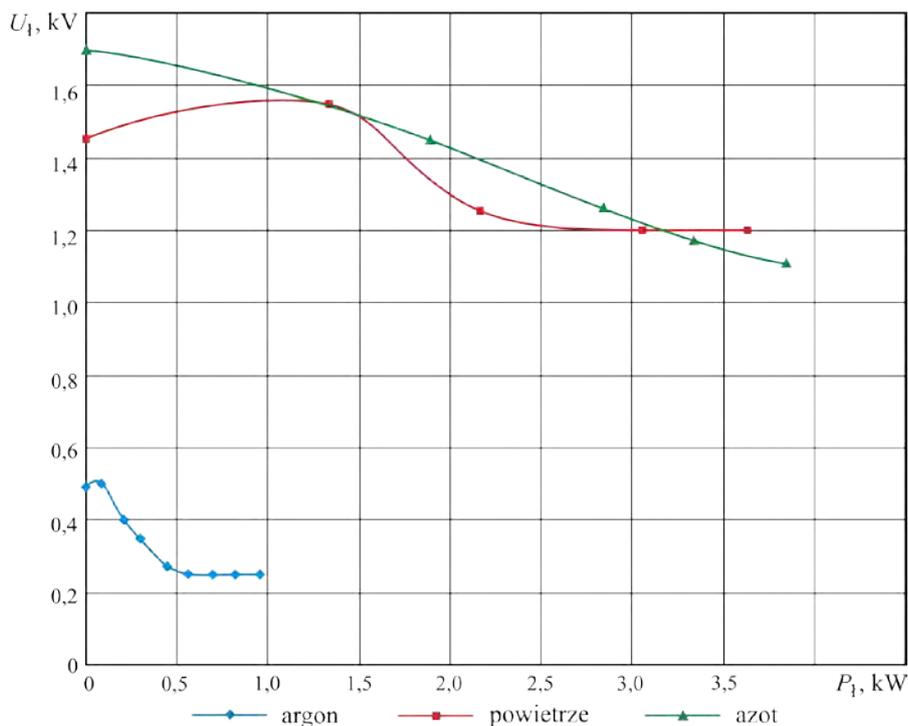


Rys. 3.4. Charakterystyki zmian napięcia łuku U_1 w funkcji prądu łuku I_1 .

W trójfazowych reaktorach plazmowych z elektrodą zapłonową napięcie stabilnie palącego się wyładowania praktycznie nie zależy od zmian prądu w szerokim zakresie. W obszarze pracy stabilnej reaktora plazmowego, tj. w zakresie ustalonej wartości napięcia wyładowania, moc łuku zależy wyłącznie od wartości prądu jakim zasilane są elektrody robocze. Najkorzystniej więc sterować mocą urządzenia plazmowego poprzez zmiany wartości prądu elektrod. Charakterystykę zależności napięcia ślizgającego się wyładowania łukowego od prądu elektrod reaktora plazmowego wykreślono na rysunku 3.4. Przedstawione na rysunku 3.4 przebiegi dla różnych gazów plazmotwórczych wskazują, że w obszarze niestabilnej pracy reaktora, spadkowi napięcia na wyładowaniu towarzyszy początkowo szybki wzrost wartości prądu wyładowania łukowego. Poza tym obszarem, wartość prądu wyładowania zmienia się liniowo ze stałym przyrostem. Minimalne wartości prądu z jakimi może pracować badany reaktor plazmowy oraz wartości prądu elektrod roboczych przy stabilnej pracy dla różnych gazów plazmotwórczych zestawiono w tabelicy 4.

Tablica 4. Wartość prądu elektrod w obszarze pracy stabilnej reaktora dla wybranych gazów.

Prąd minimalny pracy stabilnej			Prąd z jakim pracuje reaktor		
Argon	Azot	Powietrze	Argon	Azot	Powietrze
1,3 A	2 A	1,3 A	2,2 A	2 A	1,7 A



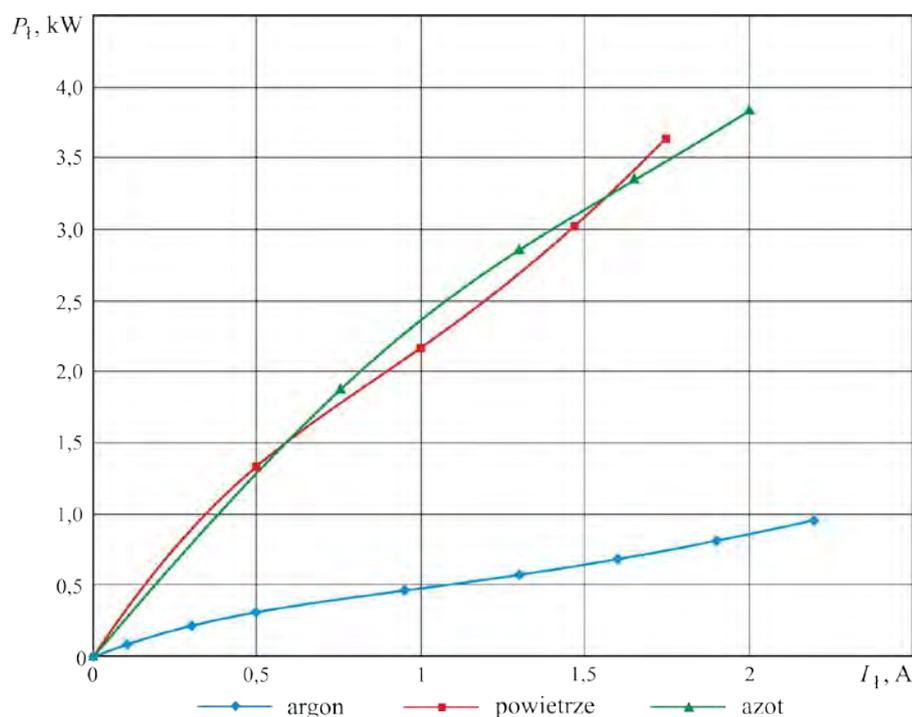
Rys. 3.5. Zmiana napięcia łuku U_1 w funkcji mocy łuku P_1 .

Obszar niestabilnego palenia się wyładowania łukowego jest nieużytecznym zakresem pracy reaktora plazmowego. W związku z tym, można wprowadzić pojęcie minimalnej mocy reaktora. Zależy ona od składu chemicznego gazu, w jakim zachodzi wyładowanie, i dla powietrza wynosi 1400 W, dla azotu 1900 W i w argonie 400 W. Charakterystyki zmian napięcia wyładowania w funkcji mocy przekazywanej do przestrzeni wyładowczej reaktora plazmowego przedstawiono na rysunku 3.5 zaś w tabelicy 5 zebrano wartości mocy z zakresu stabilnej pracy reaktora plazmowego.

Tablica 5. Moc minimalna i moc stabilnej pracy reaktora plazmowego.

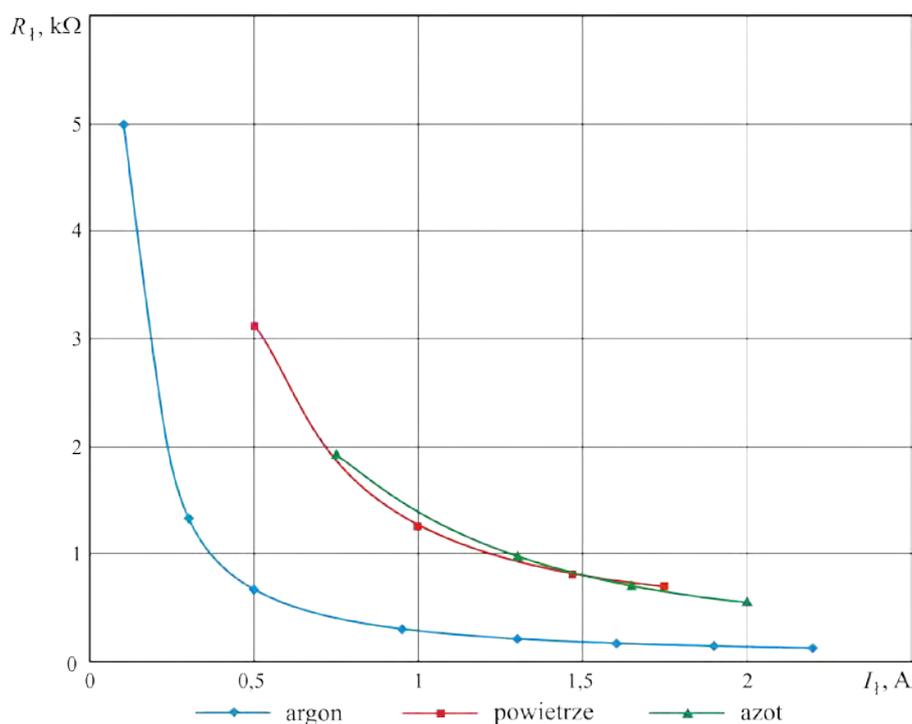
Moc minimalna			Moc przy pracy stabilnej		
Argon	Azot	Powietrze	Argon	Azot	Powietrze
400 W	1900 W	1400 W	1000 W	3800 W	3600 W

Z przedstawionych charakterystyk wynika, że sterowanie mocą reaktora plazmowego poprzez zmianę napięcia zasilającego jest znacznie mniej korzystne niż poprzez zmiany prądu elektrod. Na rysunku 3.6 przedstawiono moc wyładowania w reaktorze w funkcji prądu elektrod roboczych.



Rys. 3.6. Wykres zależności mocy wyładowania P_1 w reaktorze plazmowym od wartości prądu łuku I_1 .

Przy projektowaniu układów zasilania ważnym zagadnieniem jest określenie zmian i charakteru obciążenia, jakie stawia układowi zasilania reaktor plazmowy. Na rysunku 3.7 przedstawiono wykres zmian rezystancji przerwy międzyelektrodowej reaktora plazmowego w funkcji prądu ślizgającego się wyładowania łukowego. Po wystąpieniu zapłonu wyładowania następuje początkowo gwałtowny spadek rezystancji przestrzeni międzyelektrodowych, aż do pewnego stałego poziomu niezależnego już od dalszych zmian prądu. Wartości rezystancji łuku przy pracy stabilnej reaktora dla różnych gazów plazmotwórczych zestawiono w tabelicy 6.

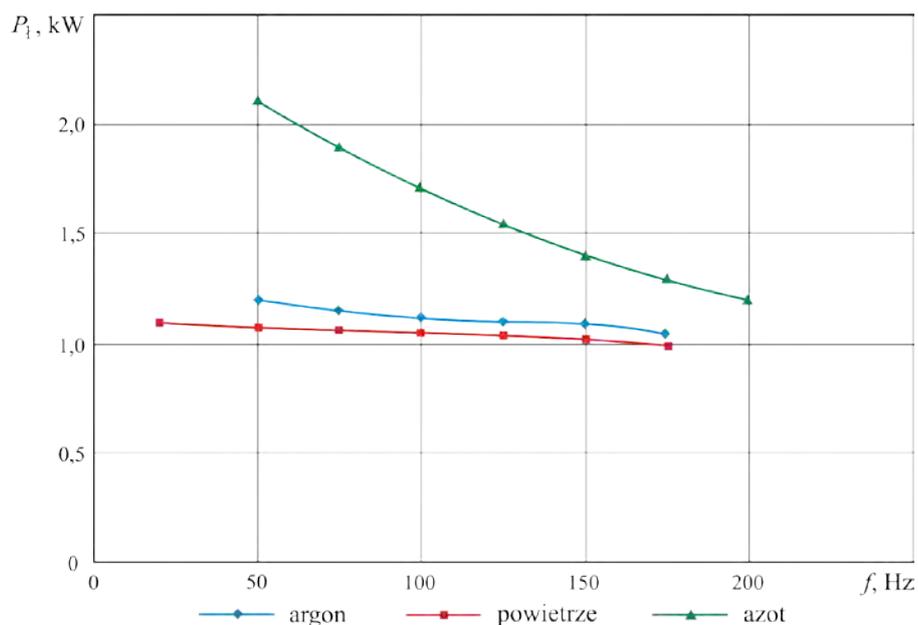


Rys. 3.7. Zmiany rezystancji przestrzeni międzyelektrodowych R_l reaktora plazmowego w funkcji prądu wyładowania I_l .

Tablica 6. Rezystancja łuku przy stabilnej pracy reaktora.

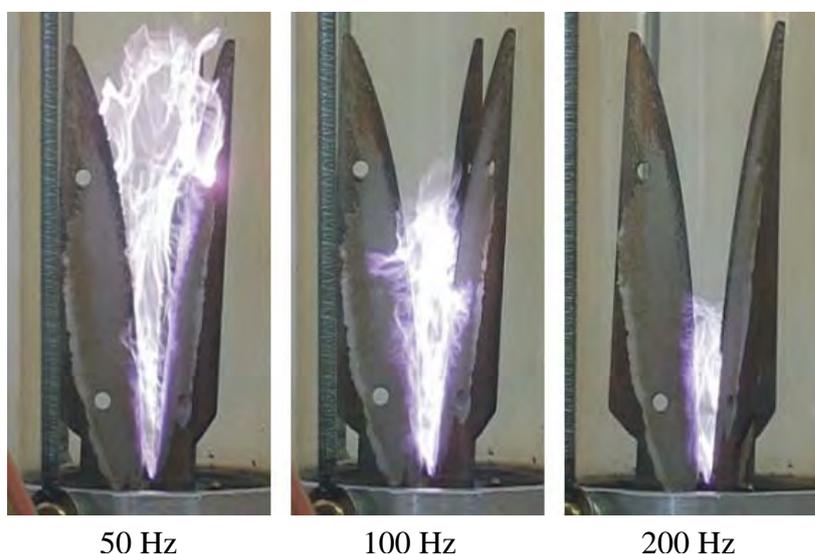
Argon	Azot	Powietrze
200 Ω	950 Ω	1200 Ω

Charakterystyki trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową mogą być kształtowane przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego elektrody robocze. Na rysunku 3.8 przedstawiono zależność mocy wyładowania w reaktorze od zmian częstotliwości przy różnych gazach.



Rys. 3.8. Wpływ częstotliwości napięcia zasilającego f elektrody robocze reaktora plazmowego na moc wyładowania P_1 .

Największy wpływ zmian częstotliwości napięcia zasilającego na wartość mocy wyładowania obserwuje się przy łuku palącym się w czystym azocie, natomiast, dla powietrza i argonu wpływ częstotliwości na moc wyładowania jest praktycznie niezauważalny.

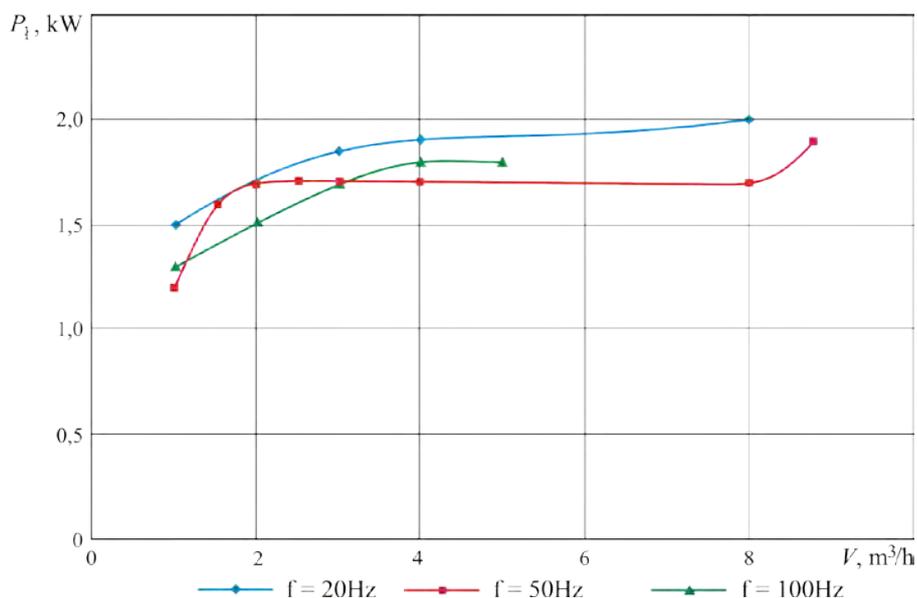


Rys. 3.9. Wpływ zmiany częstotliwości napięcia zasilającego elektrody robocze na charakter wyładowania. (napięcie wyładowania $U_1=250$ V, prąd łuku $I_1=2,2$ A, prędkość przepływu gazu 1 m³/h, gaz roboczy argon).

Zmiana częstotliwości napięcia zasilającego elektrody robocze reaktora plazmowego ma także wpływ na sposób, w jaki rozwija się wyładowanie (rys. 3.9). Przy zasilaniu reaktora napięciem o częstotliwości sieciowej wyładowanie rozwija się na całej długości

elektrod roboczych. Wskutek wzrostu częstotliwości zmniejsza się przestrzeń jaką wypełnia wyładowanie i przy 200 Hz ogranicza się ona praktycznie do niewielkiego obszaru powyżej elektrody zapłonowej. Ze wzrostem częstotliwości napięcia zasilającego następuje zmniejszenie mocy wyładowania oraz ograniczenie obszaru czynnego oddziaływania plazmy, co istotnie pogarsza sprawność reaktora plazmowego.

Na temperaturę generowanej w reaktorze plazmy wpływa się najczęściej poprzez zmianę składu chemicznego atmosfery, w jakiej zachodzi wyładowanie, lub przez zmianę natężenia przepływu gazu plazmotwórczego w komorze wyładowczej reaktora. Z charakterystyk przedstawionych na rysunku 3.10 wynika, że w badanej konstrukcji reaktora plazmowego nie obserwuje się znaczących zmian mocy wyładowania dla prędkości przepływu gazu w zakresie od 2 do 8 m³/h.



Rys. 3.10. Moc wyładowania w powietrzu P_1 w funkcji prędkości gazu roboczego V dla różnych częstotliwości napięcia zasilającego.

Na podstawie zaprezentowanych wyników pomiarów można określić technologiczny obszar pracy reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, w którym znane są wszystkie charakterystyki pracy urządzenia. Układ zasilania łukowych reaktorów plazmowych, powinien zapewniać nie tylko stabilne palenie się wyładowania, ale również możliwie jak najlepsze parametry technologiczne w każdym punkcie użytecznego obszaru pracy. Parametry elektryczne pracy badanego reaktora plazmowego zestawiono w tabelicy 7.

Tablica 7. Parametry elektryczne trójfazowego reaktora plazmowego.

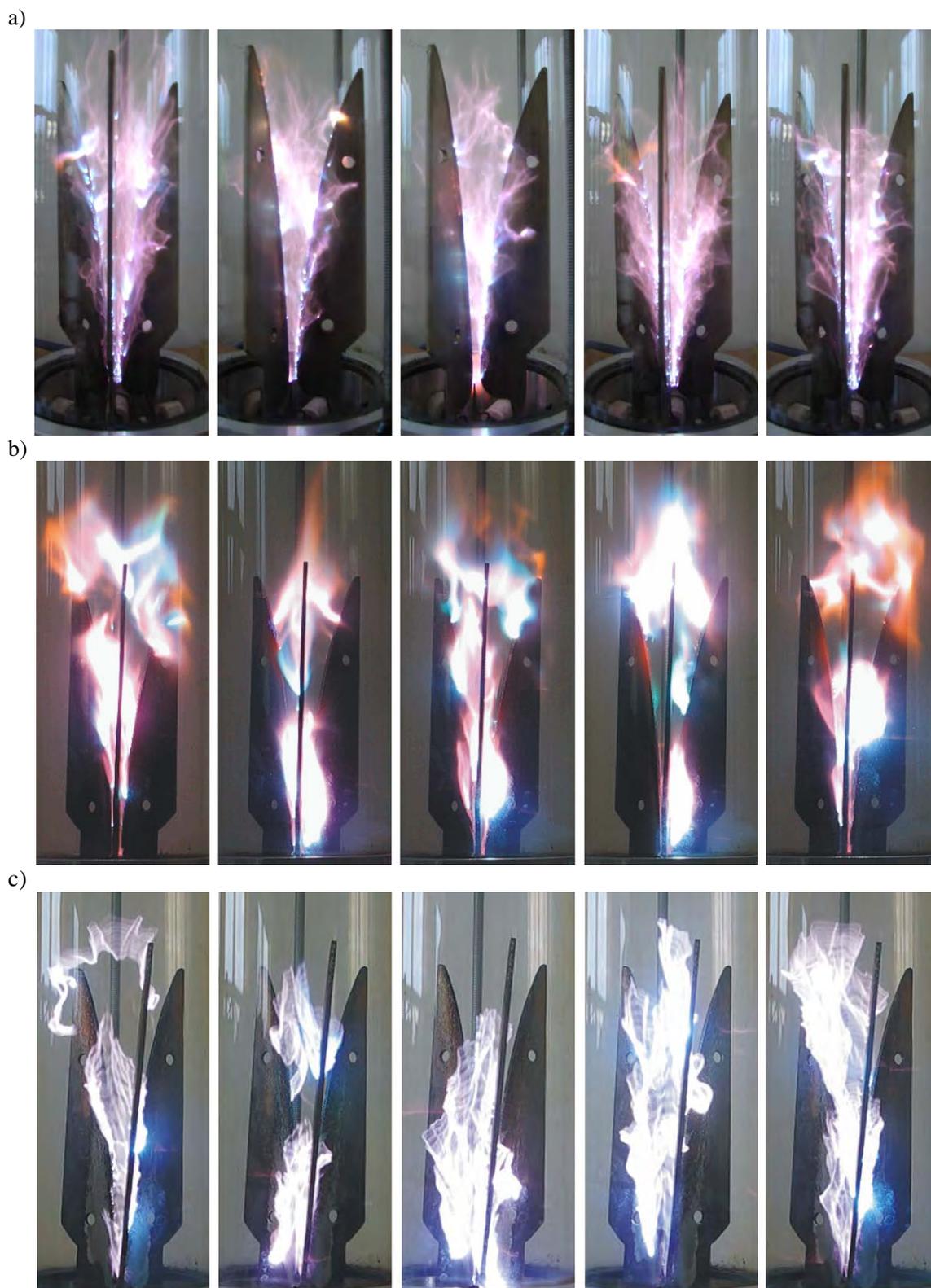
Gaz plazmotwórczy	Argon	Azot	Powietrze
Napięcie zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych	500 V	1700 V	1550 V
Napięcie stabilnej pracy reaktora plazmowego	250 V	1100 V	1200 V
Prąd pracy stabilnej reaktora plazmowego	1,3 – 2,2 A	2 A	1,3 – 1,7 A
Zakres mocy reaktora dla pracy stabilnej	400 – 1000 W	1900 – 3800 W	1400 – 3600 W

Takie przywiązanie parametrów elektrycznych do konkretnego plazmotronu z jednej strony ułatwia obliczenia i projektowanie optymalnych układów zasilania, ale z drugiej strony ogranicza zarówno liczbę rozpatrywanych urządzeń, jak i zakres zmian parametrów. Na tej podstawie można stwierdzić, że zbudowanie ogólnej teorii projektowania układów zasilania reaktorów plazmowych jest w praktyce utrudnione.

Należy podkreślić, że charakter wyładowania w reaktorze plazmowym zależy nie tylko od parametrów elektrycznych układu zasilania reaktora, ale także od budowy i rodzaju zasilacza. Na rysunku 3.11 przedstawiono zdjęcia ślizgającego się wyładowania łukowego, zachodzącego w reaktorze plazmowym przy zasilaniu go z różnych systemów:

- transformatorów o rdzeniach z blachy transformatorowej i z uzwojeniami o podwyższonej reaktancji rozproszenia – rys. 3.11a
- transformatorów z rdzeniami wykonanymi z materiału amorficznego (METGLAS) – rys. 3.11b,
- układu przekształtnikowego, poprzez transformatory podwyższające napięcie o rdzeniach wykonanych z materiału amorficznego – rys. 3.11c.

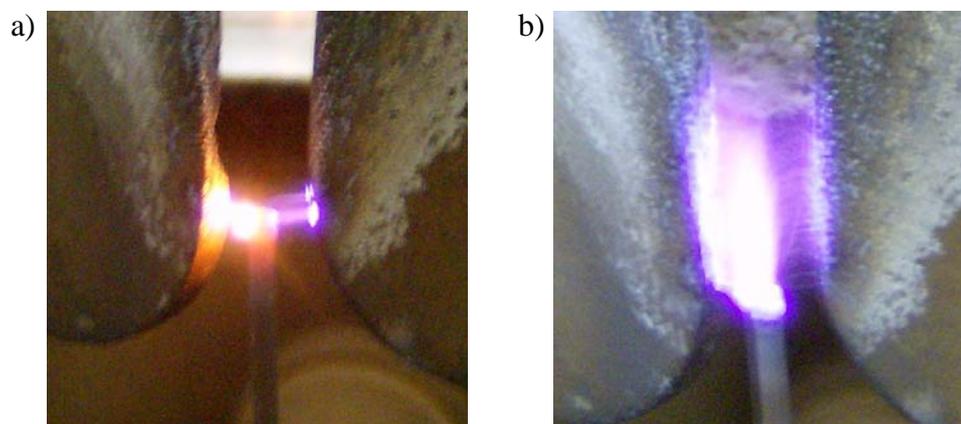
Jak łatwo zauważyć, mimo takich samych warunków pracy i parametrów elektrycznych (wartości prądu elektrod i napięcia wyładowania były we wszystkich przypadkach takie same i wynosiły 2,2 A i 250 V) oraz dla tego samego gazu (argon) charakter wyładowania ulega istotnym zmianom, tylko z powodu innego materiału, z jakiego zbudowany jest rdzeń transformatora zasilającego (przypadek 3.11a i 3.11b). Należy to tłumaczyć różnymi pasmami przenoszenia, odkształconych wyższymi harmonicznymi sygnałów napięcia, przez tradycyjny rdzeń z blachy transformatorowej oraz rdzeń amorficzny. Ponadto, w przypadku zasilania reaktora plazmowego z układu przekształtnikowego, w przebiegach napięć pojawiają się wyższe harmoniczne wynikające z częstotliwości próbkowania sygnałów prądów i napięć, które wyraźnie wpływają na przebieg wyładowania.



Rys. 3.11. Wyładowanie elektryczne zachodzące w trójfazowym reaktorze plazmowym przy zasilaniu reaktora z różnych układów (argon, napięcie wyładowania $U_f=250$ V, prąd łuku $I_f=2,2$ A, prędkość przepływu gazu $1 \text{ m}^3/\text{h}$).

3.1. Zapłon ślizgającego się wyładowania łukowego

Zapłon wyładowania na elektrodach roboczych reaktora plazmowego inicjowany jest przeskokiem iskry elektrycznej (rys. 3.12) pomiędzy elektrodą zapłonową a jedną z trzech elektrod roboczych.

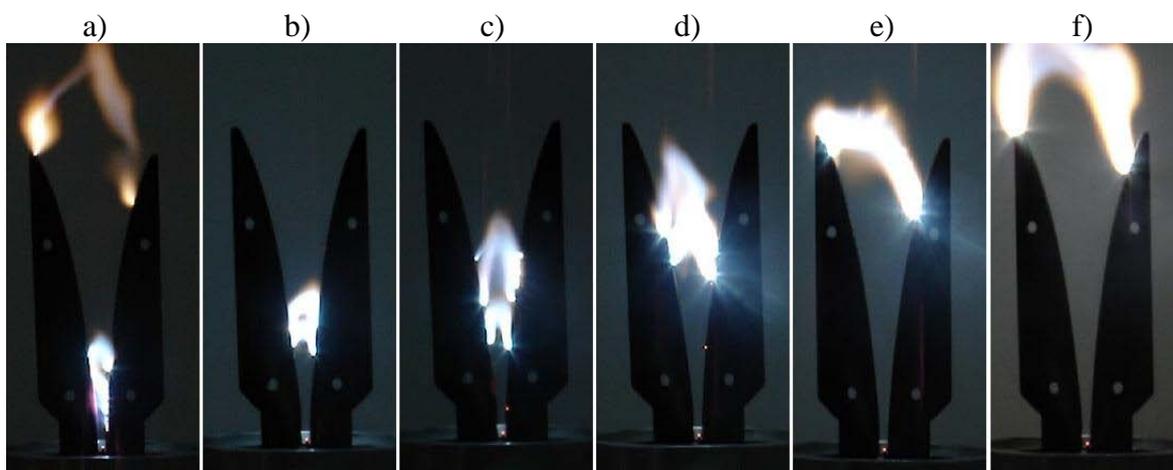


Rys. 3.12. Zdjęcia iskry zapłonowej: a – bez przepływu gazu, b – z przepływem gazu równym $1 \text{ m}^3/\text{h}$ (napięcie 15 kV, częstotliwość 20 kHz, prąd 40 mA).

Zdjęcie przedstawionej na rysunku 3.12a iskry zapłonowej zostało wykonane przy braku przepływu gazu przez komorę wyładowczą reaktora. Pojedynczy kanał iskry elektrycznej jest rozdmuchiwany, w trakcie pracy reaktora, gazem napływającym z dyszy do komory wyładowczej. W efekcie pomiędzy elektrodami reaktora występuje obszar silnie zjonizowanego gazu a przebiecie iskrowe składa się z całego drzewa rozgałęziających się kanałów (rys. 3.12b) [36]. Wyładowania iskrowe w reaktorze plazmowym, zachodzą w gazie pod ciśnieniem zbliżonym do atmosferycznego, przy napięciu 10-15 kV i prądzie nie przekraczającym 40 mA, ale są wystarczające do zjonizowania przestrzeni w miejscu zapłonu głównego wyładowania między elektrodami roboczymi. Po przebicciu przerwy międzyelektrodowej, kiedy jej rezystancja staje się bardzo mała, napięcie w obszarze wyładowania spada poniżej wartości napięcia gaśnięcia, co pociąga za sobą przerwanie wyładowania iskrowego. Następnie napięcie międzyelektrodowe ponownie wzrasta i proces powtarza się. W trójfazowym reaktorze plazmowym z dodatkową elektrodą zapłonową odległość przerw międzyelektrodowych w strefie zapłonu wyładowania jest mniejsza niż 1 cm, i rozwój wyładowania iskrowego na elektrodzie zapłonowej może być opisany mechanizmem opracowanym przez Townsenda. Dla większych przerw międzyelektrodowych wyładowanie iskrowe rozwija się w nierównomiernym polu elektrycznym i przy mniejszych natężeniach tego pola niż wynikałoby to z obliczeń przeprowadzonych przez Townsenda [37].

3. 2. Cykl pracy reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem

Z chwilą zamknięcia się kanału iskry elektrycznej między elektrodami roboczymi, wzrasta moc dostarczana do wyładowania. Przy wzroście mocy źródła prądu kanały iskrowe rozszerzają się w szerokie pasma i wyładowanie przechodzi w tzw. zagęszczone wyładowanie iskrowe. Przy dalszym wzroście mocy źródła wyładowanie przekształca się w łuk elektryczny [38]. Na rysunku 3.13 przedstawiono rozwój wyładowania łuku swobodnego w trakcie cyklu pracy dwuelektrodowego reaktora plazmowego od chwili zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych do chwili jego zgaszenia.



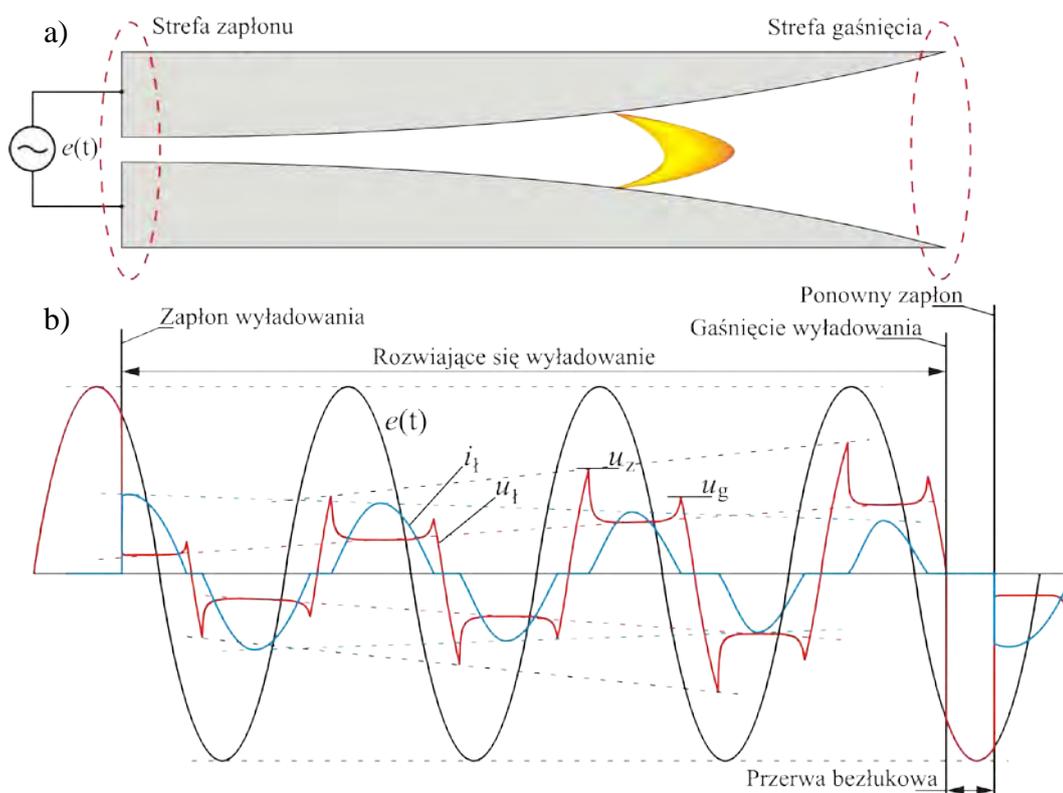
Rys. 3.13. Rozwój wyładowania łukowego przy jego naturalnym unoszeniu się w trakcie cyklu pracy dwuelektrodowego reaktora plazmowego.

W łuku elektrycznym emisja elektronów z elektrod ma charakter termiczny, dlatego charakterystyczne dla łuku jest to, że im większy jest prąd wyładowania tym mniejsze napięcie jest potrzebne do podtrzymania jego płonienia. Przy stosunkowo dużym wzroście prądu występuje niewielki spadek napięcia, w efekcie wzrasta moc wydzielana w łuku. Wzrost mocy łuku pociąga za sobą wzrost temperatury katody a więc i wzrost jej emisji.

Temperatura kolumny łuku elektrycznego zazwyczaj wynosi 4000-7000 K i rośnie wraz z ciśnieniem gazu. W reaktorach plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym dąży się do osiągnięcia łuku długiego o stosunkowo szerokiej kolumnie. Łuk ten musi być na tyle zimny, by nie topić materiału elektrod i elementów konstrukcyjnych reaktora. Równocześnie palący się w reaktorach łuk musi zapewniać odpowiednie parametry generowanej w nim plazmy dla prowadzonych reakcji plazmo-chemicznych. Taki łuk można otrzymać przy stosunkowo wysokim napięciu i niskich wartościach prądu, przy czym istnieją określone wartości napięcia i prądu, zależne od gazu i odległości między elektrodami, poniżej których łuk gaśnie. Istotny wpływ na wytrzymałość przerwy

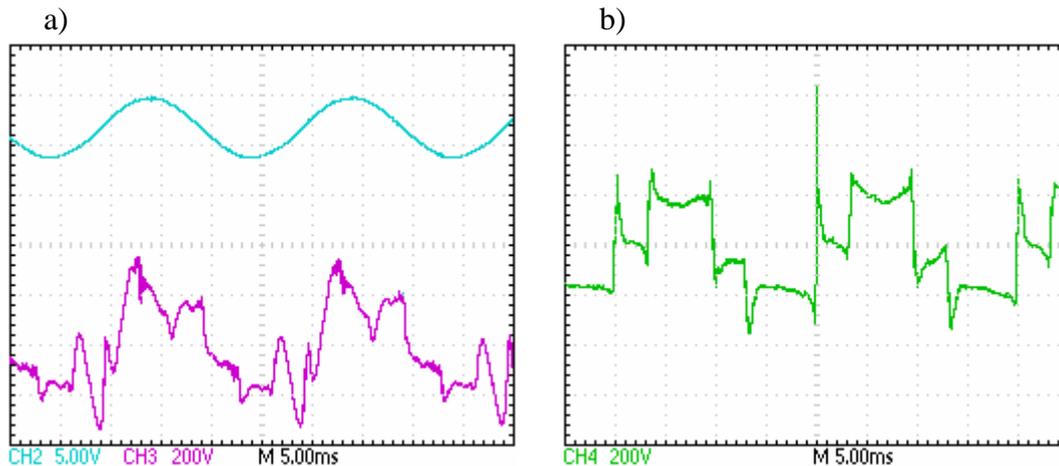
międzyelektrodowej mają parametry termodynamiczne gazu w jakim zachodzi wyładowanie łukowe, a w szczególności skład chemiczny gazu, ciśnienie, temperatura, w mniejszym zaś stopniu, prędkość gazu przepływającego przez komorę wyładowczą reaktora.

Ślizgający się łuk elektryczny, jako odbiornik energii elektrycznej, wraz z układem zasilania tworzą obwód o parametrach nieliniowych i niestacjonarnych. Na rysunku 3.14 przedstawiono teoretyczne przebiegi napięć i prądów w trakcie trwania jednego cyklu pracy dwuelektrodowego reaktora plazmowego.



Rys. 3.14. Chwilowe przebiegi napięć i prądów dwuelektrodowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym; a – budowa reaktora, b – przebiegi chwilowe: $e(t)$ – napięcie źródła zasilania, u_l – napięcie łuku, i_l – prąd łuku, u_z – napięcie zapłonu wyładowania, u_g – napięcie gaśnięcia wyładowania.

Z charakterystyk rzeczywistych przedstawionych na rysunku 3.15 wynika, że dla reaktora trójfazowego prąd łuku jest praktycznie sinusoidalny natomiast silnemu odkształceniu ulega napięcie. Największą zawartość wyższych harmonicznych generowanych przez łuk elektryczny obserwuje się w napięciu fazowym. W napięciu międzyfazowym spektrum wyższych harmonicznych jest pomniejszone o harmoniczne jednakofazowe.



Rys. 3.15. Przebiegi prądu i napięcia pracującego reaktora plazmowego: a – przebiegi prądu fazowego (CH2) i napięcia fazowego (CH3), b – napięcie międzyfazowe (CH4).

W wyprowadzanych dla takich obwodów zależnościach analitycznych zawsze występują współczynniki, które należy wyznaczać doświadczalnie. Z tego też powodu niejednokrotnie łatwiej jest analizować właściwości odbiorników łukowych na podstawie pomiarów rzeczywistych układów. W praktyce właściwości te określa się na podstawie charakterystyk przedstawiających związki pomiędzy opisującymi wyładowanie wielkościami fizycznymi, według:

$$U_1 = f(I_1, E_j, p, l_1, T, W_e), \quad (3.1)$$

gdzie: U_1 – wartość skuteczna napięcia łuku, I_1 – wartość skuteczna prądu łuku, E_j – potencjał jonizacji zależny od składu chemicznego środowiska, p – ciśnienie, l_1 – długość łuku, T – temperatura, W_e – praca wyjścia elektronu zależna od materiału elektrod.

W łukowych reaktorach plazmowych istotnym problemem jest utrzymanie nieprzerwanego palenia się wyładowania łukowego o ściśle ustalonych, dla danego procesu technologicznego, parametrach. Proces palenia i gaśnięcia wyładowania łukowego zależy od jego przewodności, a ta, z kolei, zależy od mocy akumulowanej w łuku. Bilans mocy jednostki objętości łuku wyraża równanie:

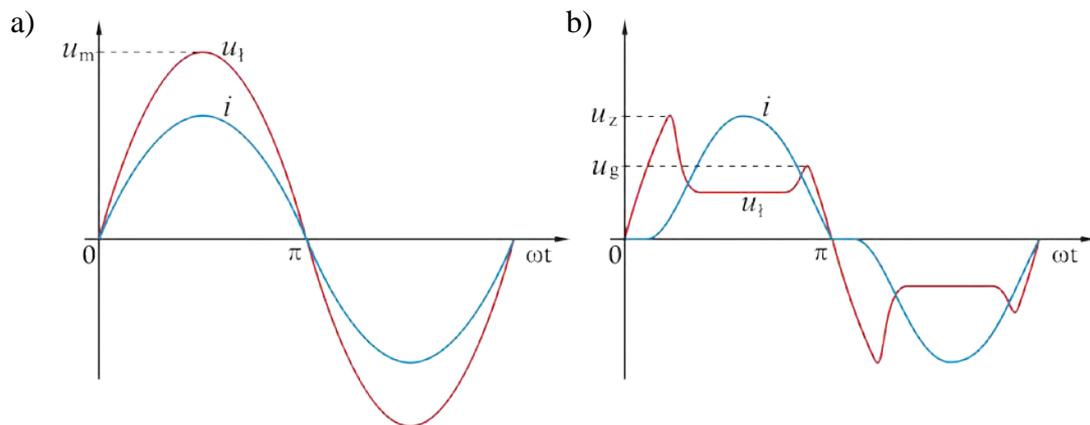
$$P_w = P_i - P_r + P_{\text{prom}} + P_{\text{przew}} + P_{\text{konw}} + P_{\text{ak}}, \quad (3.2)$$

w którym: P_i – moc tracona w jednostce objętości na jonizację; P_r – moc wydzielona w łuku na skutek rekombinacji ładunków i tworzenie atomów neutralnych; P_{prom} – moc promieniowania łuku wyrażona prawem Plancka; P_{przew} – moc odprowadzana z jednostki objętości łuku w drodze przewodnictwa; P_{konw} – moc odprowadzana z jednostki objętości łuku w drodze konwekcji; P_{ak} – moc akumulowana w jednostce objętości łuku powodująca zmianę jego temperatury.

Najistotniejszą rolę w obwodach elektrycznych, w których występuje wyładowanie, odgrywa rezystancja kolumny łukowej. Rezystancja ta może być wyrażona jedynie w postaci różniczkowej:

$$r_l = \frac{dU_l}{di_l}. \quad (3.3)$$

Występujące we wzorze 3.3 napięcie łuku jest sumą spadku napięcia w kolumnie plazmy łukowej oraz anodowego i katodowego spadku napięcia. Katodowy spadek napięcia jest zjawiskiem charakterystycznym dla wyładowania łukowego. Spadek ten równy jest napięciu jonizacji gazu i dlatego decyduje o trwaniu raz zapoczątkowanego procesu płonienia łuku. Z kolei, w obszarze anodowego spadku napięcia następuje przyspieszenie elektronów zdążających do anody. Elektrony te, uderzając w anodę, oddają jej energię kinetyczną, co powoduje silne jej nagrzanie. Na skutek bombardowania anody elektronami następuje z niej emisja wtórna. Z emisją tą związany jest przestrzenny ładunek ujemny, który powstaje nad powierzchnią elektrody. Ładunek ten wpływa na charakterystyki dynamiczne łuku prądu przemiennego, tj. zależność wartości chwilowych napięcia łuku od prądu. W przypadku łuku prądu przemiennego, z chwilą zmiany polaryzacji elektrod, łuk gaśnie. Przed ponownym zapłonem łuku ujemny ładunek przestrzenny musi przesunąć się do nowej anody. W tym czasie następuje ochłodzenie elektrod i dlatego ponowny zapłon wyładowania następuje przy wyższym napięciu niż zgaśnięcie łuku (rys. 3.16b). Dodatkowym zjawiskiem powodującym tę różnicę napięć jest dejonizacja łuku w wyniku odprowadzania z niego ciepła.



Rys. 3.16. Przebiegi napięcia i prądu łuku: a – dla łuku dobrze izolowanego cieplnie, b – dla łuku intensywnie chłodzonego; i – prąd łuku, u_l – napięcie łuku, u_z – napięcie zapłonu wyładowania, u_g – napięcie gaśnięcia wyładowania.

W łuku dobrze izolowanym cieplnie i o dużej mocy, przewodność nie ulega zmianie w czasie każdego półokresu i dlatego napięcie oraz prąd mogą być uznane za praktycznie sinusoidalne (rys. 3.16a).

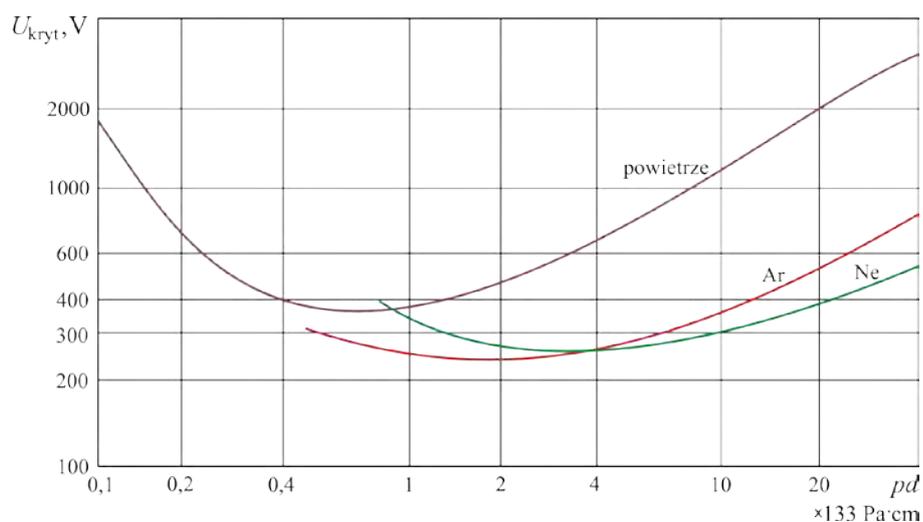
3.3. Wpływ rodzaju gazu na wyładowanie elektryczne

Zmiana natężenia przepływu gazu przez komorę wyładowczą reaktora wpływa na temperaturę generowanej plazmy. Z kolei przy danym przepływie gazu i stałej mocy dostarczanej do łuku, wartość temperatury plazmy zależy od rodzaju użytego gazu. Najwyższe temperatury pozwalają osiągać gazy jednoatomowe i gazy szlachetne, gdyż nie trzeba dostarczać im energii dysocjacji do rozbicia cząstek wieloatomowych. Dlatego też, dla podtrzymania łuku w gazie wieloatomowym, konieczne jest wyższe napięcie niż dla gazu jednoatomowego.

Paschen wykazał, że napięcie zapłonu wyładowania samoistnego w gazie U jest funkcją ciśnienia gazu p i odległości między elektrodami d [39]:

$$U = f(pd). \quad (3.4)$$

Na rysunku 3.17 pokazano przebieg krzywej Paschena dla wybranych gazów. Zgodnie z teorią Townsenda, krzywa Paschena łączy punkty, w których jeden elektron pierwotny, wytworzywszy lawinę, reprodukuje się sam. Krzywa Paschena stanowi granicę obszaru, powyżej którego jeden elektron pierwotny wytwarza więcej niż jeden elektron wtórny, zaś poniżej którego rozciąga się obszar niewystarczającej reprodukcji.



Rys. 3.17. Przebieg krzywych Paschena dla wybranych gazów.

Z rysunku 3.17 wynika, że kształt krzywej Paschena, jak również wytrzymałość dielektryczna gazu na przebicie, zależą w istotny sposób od rodzaju, składu gazu, materiału elektrod, ale przede wszystkim od ciśnienia gazu i odległości międzyelektrodowej. Postać matematyczna prawa Paschena uwzględniająca rodzaj gazu, wprowadzona została przez Engela i Steenbecka [39] i wyrażona jest równaniem:

$$U = B \frac{pd}{C + \ln(pd)}, \quad (3.5)$$

gdzie B i C są stałymi zależnymi od rodzaju gazu. Należy podkreślić, że prawo Paschena spełnione jest wyłącznie dla niezbyt dużych ciśnień gazu i niewielkich odległości między elektrodami. Prawo to również nie ma zastosowania w przypadku wystąpienia jonizacji termicznej gazu i przestrzennej rekombinacji elektronów i jonów.

Przy jonizacji termicznej zależność koncentracji elektronów, jonów i atomów obojętnych od temperatury wyznacza równanie Saha [67]:

$$\frac{n_e n_j}{n} = A \left(\frac{2\pi m_e kT}{h} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{W_j}{kT}\right), \quad (3.6)$$

gdzie: m_e – masa elektronu, n_e, n_j, n – odpowiednio, koncentracja elektronów, jonów i cząstek neutralnych, T – temperatura, k – stała Boltzmann, h – stała Plancka, W_j – energia jonizacji gazu, A – stała zależna od ciężaru atomowego gazu. W elektrotechnice do praktycznych obliczeń stopnia jonizacji wygodniej jest wykorzystywać równanie Saha w innej postaci [67]:

$$\lg\left(\frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2} p\right) = -6,48 + 2,5 \lg T - \frac{5037}{T} \varphi_j, \quad (3.7)$$

gdzie: p – ciśnienie wyrażone w atmosferach, α – stopień jonizacji gazu wyrażony zależnością:

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n}. \quad (3.8)$$

Występującą we wzorze 3.7 wartość potencjału jonizacji określa się jako stosunek energii jonizacji W_j i ładunku e :

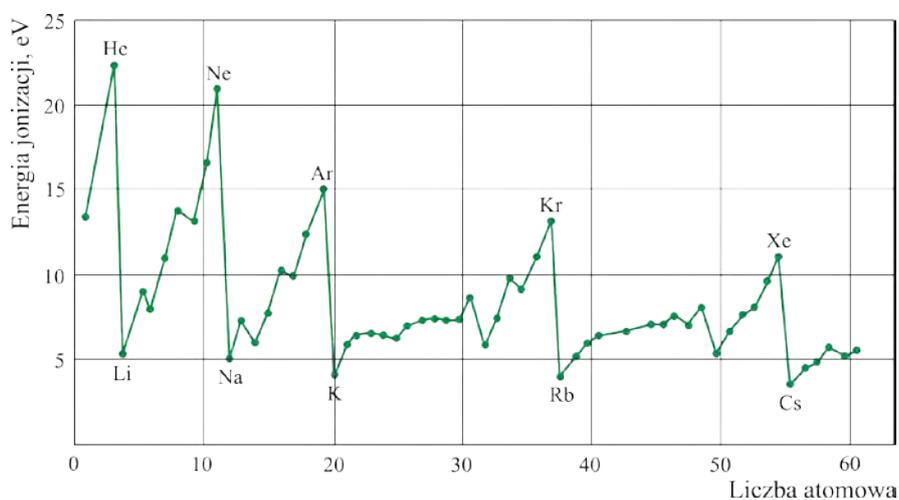
$$\varphi_j = \frac{W_j}{e}, \quad (3.9)$$

przy czym, potencjał jonizacji zależy od rodzaju gazu i stopnia jonizacji i zawiera się w granicach od kilkunastu do około 25 eV, przy jonizacji jednokrotnej. Najmniejsze wartości potencjału jonizacji, rzędu 4-6 eV, mają metale alkaliczne, których atomy

posiadają po jednym elektronie walencyjnym. Największe wartości potencjału jonizacji przypadają gazom szlachetnym, których zewnętrzne powłoki elektronowe są całkowicie wypełnione. Najwyższy potencjał jonizacji ze wszystkich pierwiastków ma hel i wynosi on 24,6 eV. Należy zaznaczyć, że żadna siła chemiczna nie może dostarczyć takiej energii, która jest potrzebna do utworzenia He^+ . W tabelicy 8 ujęto energie jonizacji wybranych pierwiastków dla jonizacji jednokrotnej, dwukrotnej i trzykrotnej. Godny uwagi jest również fakt, że energia jonizacji zmienia się periodycznie w układzie okresowym pierwiastków, zarówno przy przechodzeniu wzdłuż okresów, jak i wewnątrz grup układu okresowego, co pokazano na rysunku 3.18.

Tablica 8. Energie jonizacji wybranych pierwiastków [54]

Pierwiastek	Jonizacja jednokrotna	Jonizacja dwukrotna	Jonizacja trzykrotna
	eV	eV	eV
H	13,6	-	-
He	24,6	54,2	-
C	11,3	24,3	46,3
N	14,5	29,5	47,2
O	13,6	34,9	54,9
Ne	21,5	40,9	63,4
Na	5,1	47,5	70,8
Ar	15,7	27,8	36,8
K	4,3	31,7	46,1
Kr	13,9	24,7	38,0
Cs	3,9	23,5	34,6



Rys. 3.18. Energia jonizacji pierwiastków w zależności od liczby atomowej.

Wytrzymałość dielektryczna gazów na przebicie zależy od wartości potencjału wzbudzenia wyrażanego równaniem [67]:

$$\varphi_w = \frac{W_w}{e}, \quad (3.10)$$

gdzie: W_w – stosunek energii wzbudzenia, e – ładunek. Wartość tego potencjału zależy od rodzaju gazu i wynosi od kilku do kilkunastu woltów. Gazy, które charakteryzują się niską energią poziomów wzbudzenia, wykazują większą wytrzymałość dielektryczną na przebicie niż gazy, których energia wzbudzenia jest wysoka. Gazy szlachetne pomimo wysokich energii jonizacji mają niższą wytrzymałość dielektryczną, ponieważ ich stany wzbudzenia mają wysokie energie i leżą blisko poziomu jonizacji.

Na procesy wyładowań elektrycznych zachodzących w reaktorach plazmowych bardzo istotny wpływ ma czystość gazu plazmotwórczego. Nawet śladowe ilości domieszek o niskim potencjale jonizacyjnym mogą wyraźnie zmienić wartość współczynnika elektronowej jonizacji przestrzennej gazu i zmieniać napięcie zapłonu wyładowania. Występuje również zjawisko przylepiania się jonów do zanieczyszczeń w gazie (kurz, para wodna itp.) i tym sposobem tworzenie się powolnych jonów Langevina. Przy zbyt dużym zanieczyszczeniu gazu plazmotwórczego napięcie zapłonu wyładowania może wzrosnąć do poziomu, jakiego nie jest w stanie dostarczyć układ zasilania reaktora plazmowego, a w konsekwencji do wyłączenia urządzenia plazmowego i przerwania procesu technologicznego.

Skład plazmy łukowej generowanej w komorze wyładowczej trójfazowego reaktora plazmowego może być bardzo złożony. Plazma powstała z prostego chemicznie i jednorodnego gazu, jakim jest azot, zawiera poza elektronami także obojętne atomy i obojętne dwuatomowe cząsteczki azotu, dodatkowo jony azotu z jednym, lub wieloma ładunkami elementarnymi, dodatkowo jony cząsteczkowe oraz wzbudzone cząstki atomu.

3.4. Wpływ materiału elektrod na wyładowanie łukowe

Przy konstruowaniu przemysłowych reaktorów plazmowych szczególną uwagę zwraca się na uzyskanie dużej żywotności elektrod. Zagadnienie to jest szczególnie istotne przy pracach ze znacznymi mocami, nierzadko przekraczającymi 1 MW, prądami przekraczającymi kilkaset amperów oraz w środowiskach agresywnych chemicznie.

Elektrody stosowane w reaktorach plazmowych mogą być wykonane jako zużywalne lub nieużywalne. Elektrody zużywalne często stanowią jeden z substratów reakcji

chemicznych. Znajdują one zastosowanie w spawalnictwie, np. spawanie, cięcie, napawanie, oraz w metalurgicznych procesach natryskiwania, karbotermicznej redukcji tlenków metali, sferoidyzacji proszków, wytwarzania nanorurek [40], [41]. Niewłaściwa erozja elektrod powoduje zakłócenia w realizacji procesu technologicznego, zmniejsza żywotność reaktora plazmowego a w skrajnym przypadku może być przyczyną awarii urządzenia.

Elektrody niezużywalne z założenia winny być wyłącznie przewodnikiem elektryczności. W rzeczywistości na elektrodach tych występuje zjawisko erozji. Produkty erozji elektrod osadzają się na elementach konstrukcyjnych reaktora plazmowego oraz zanieczyszczają środowisko plazmowo-gazowe. Wzrost stężenia produktów erozji elektrod w gazie może mieć niepożądany wpływ na proces plazmowy. Zanieczyszczenia mogą wchodzić w reakcje chemiczne z substancjami poddawanych obróbce plazmowej, powodując zmiany parametrów energetycznych, zakłócenia w ciągłości procesów technologicznych oraz zwiększenie kosztów eksploatacji reaktora plazmowego. Dlatego, stężenie zanieczyszczeń innymi gazami, pyłami i parami nie powinno przekraczać wartości dopuszczalnych.

Na trwałość elektrod wpływa wiele czynników takich jak: sposób wykonania, jakość użytych materiałów, sposób chłodzenia, skład chemiczny i ciśnienie gazu, natężenie prądu łuku. Doskonaląc konstrukcję reaktora plazmowego pod względem doboru materiałów, kształtów geometrycznych, rozmiarów i warunków chłodzenia można osiągnąć poprawę jego żywotności. Inną metodą wydłużania czasu bezawaryjnej pracy reaktorów plazmowych jest ingerencja w ich układy zasilania i sterowania energią elektryczną.

Jakość działania źródeł zasilania w energię elektryczną, w tym również układów zapłonowych, ma istotny wpływ na żywotność elementów konstrukcyjnych reaktorów plazmowych. Materiały do budowy elektrod muszą spełniać szereg wymagań, takich jak: niska praca wyjścia, wysoka temperatura topnienia, niskie stężenie zawartych gazów i zbędnych, łatwo parujących, domieszek, wysoka odporność chemiczna, stabilność struktury powierzchni. W tabeli 9 ujęto wybrane parametry niektórych materiałów elektrodowych [42].

Ważnym zjawiskiem występującym podczas wyładowań elektrycznych w gazach jest emisja elektronów polegająca na wyjściu elektronów z metalowych elektrod do otaczającej przestrzeni. Zjawisko to polega na pokonaniu przez elektrony sił wiążących je z tym ciałem, w wyniku udzielenia im energii z zewnątrz. Energię tę elektron może uzyskać w rozmaity sposób, na przykład pod wpływem kwantu promieniowania (zjawisko

fotoemisji), pod wpływem bardzo silnego pola elektrycznego (tzw. efekt polowy), czy też wysokiej temperatury (zjawisko termoemisji).

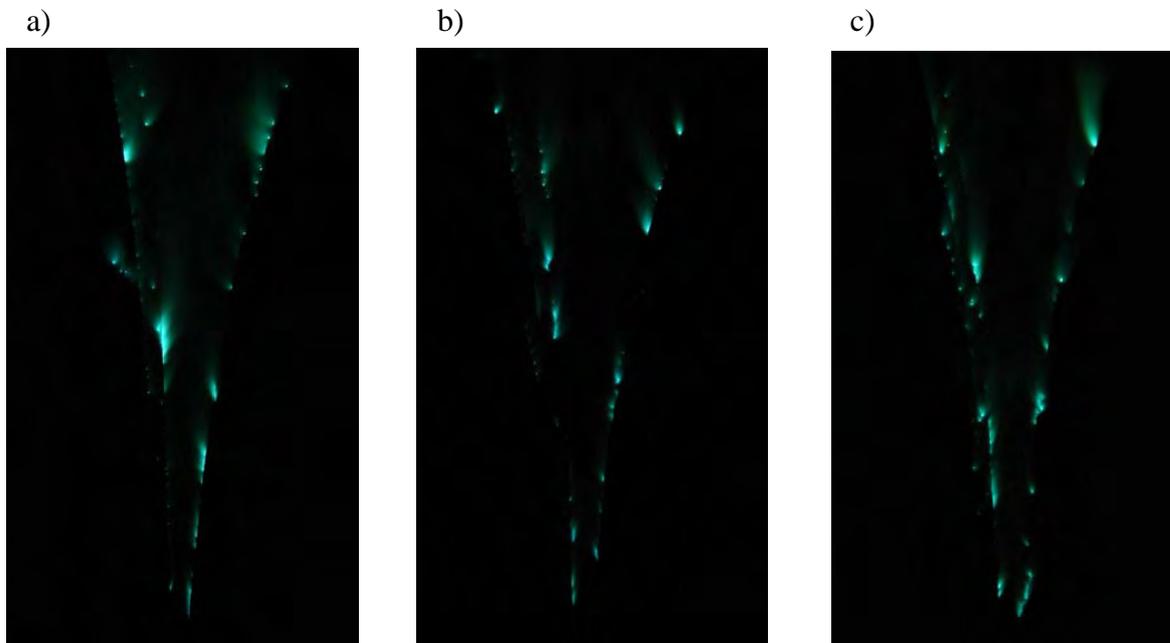
Tabela 9. Wybrane parametry niektórych materiałów elektrodowych [42]

Materiał	Praca wyjścia elektronów W_e , eV	Konduktywność σ , S/m	Przewodność cieplna właściwa λ , W/(m·K)	Temperatura topnienia K	Najkorzystniejsze medium gazowe	Dopuszczalne medium gazowe	Zabronione medium gazowe
W	4,53	$20,4 \cdot 10^6$	130	3663	He, Ar, Kr	H ₂ , N ₂ , Cl ₂ , F ₂ , CH ₄	powietrze, O ₂ , H ₂ O
W+Th	2,84-3,20	$(18-20) \cdot 10^6$	130	3663	He, Ar, Kr	H ₂ , N ₂ , Cl ₂ , F ₂ , CH ₄	powietrze, O ₂ , H ₂ O
W+La	-	-	-	-	He, Ar, Kr	H ₂ , N ₂ , Cl ₂ , F ₂ , CH ₄	powietrze, O ₂ , H ₂ O
Cu (CuO)	4,48 (5,30)	$56,20 \cdot 10^6$	370	1356	Ar	H ₂ , N ₂ , powietrze	-
Ag	4,70	$60,50 \cdot 10^6$	408	1234	Ar	powietrze	-
Cu+Ag	w zależności od składu stopu				Ar	powietrze	-
Grafit	4,36	$(0,20-0,05) \cdot 10^6$	100-200	4100	Ar, CH ₄ , CO ₂	H ₂ , N ₂ , powietrze	O ₂
Zr	3,9	$2,4 \cdot 10^6$	22	2128	Ar+N ₂ , CH ₄	N ₂ , Ar	H ₂ , H ₂ O
ZrO ₂	4,20	10^2-10^8	2,27	2900	powietrze	Ar+O ₂	-
Hf	3,53	$3,3 \cdot 10^6$	22	2495	Ar+N ₂ , CH ₄	N ₂ , Ar	H ₂ , H ₂ O
HfO ₂	-	10^5-10^{11}	1,5	2780	powietrze	Ar+O ₂	-
HfN	3,9	300	17	3000	N ₂ , Ar+N ₂	powietrze	-

W łuku elektrycznym emisja elektronów z katody ma przede wszystkim charakter termiczny. Gęstość prądu wyładowania łukowego na powierzchni katody może osiągać setki a nawet tysiące amperów na 1 cm². W obszarach przylegania łuku do elektrod wartość temperatury jest zbliżona, a niekiedy wyższa do temperatury topnienia materiału elektrod. Pomimo intensywnego chłodzenia elektrod, z płam łukowych wyrzucana jest struga par materiału elektrod, która jest następnie unoszona przez gaz plazmotwórczy. Na rysunku 3.19 przedstawione są płamy elektrodowe występujące na elektrodach roboczych, wykonanych ze stali kwasoodpornej o symbolu 0H18N9, reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

W przypadku reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym nie bez znaczenia jest prędkość przemieszczania się płam elektrodowych. Prędkość ta zależy od inercyjności cieplnej warstwy powierzchniowej elektrod [42]. Płamy

elektrodowe nie wykazują tendencji do przemieszczania się po powierzchni czystego wolframu, węgla oraz takich metali jak: kadm, cynk, ołów, mangan, natomiast przemieszczają się bardzo szybko po powierzchni elektrod wykonanych z miedzi, żelaza, niklu, srebra i złota.



Rys. 3.19. Plamy elektrodowe występujące na elektrodach roboczych trójelektrodowego reaktora łukowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym dla różnych gazów plazmotwórczych: a – argon, b – azot, c – powietrze.

Dla elektrod wykonanych z aluminium i cyny, plamy elektrodowe pozostają stałe dla łuku silnopiędowego natomiast przemieszczają się dla łuku słabopiędowego. Generalnie, na słabiej parujących metalach można uzyskać ruchliwe łuki, których plamy elektrodowe przemieszczają się pod wpływem oddziaływania czynników zewnętrznych.

3.5. Łuk trójfazowy

Projektowanie układów zasilania reaktorów plazmowych wymaga sformułowania modelu wyładowania elektrycznego, który przy analizie obwodowej polega na poszukiwaniu zależności między chwilową wartością konduktancji łuku a prądem bądź napięciem łuku.

Badania fizyczne i opracowania analityczne odnoszą się do czterech przedziałów czasowych występowania wyładowania łukowego:

- okresu zapłonu,
- okresu prądowego, dla którego moc łuku nie wykazuje znaczących zmian,

- okresu zera prądu, w czasie którego ma miejsce szybka zmiana mocy łuku i związanych z nią parametrów hydrodynamicznych plazmy łuku i jej otoczenia,
- okresu po zaniknięciu prądów połukowych.

Zarówno dla okresu prądowego jak i okresu zera prądu najczęściej zakłada się lokalną równowagę termodynamiczną, przy której energii wydzielona i odbierana z łuku są równe. Przy takim założeniu upraszczającym możliwe jest połączenie okresu prądowego i okresu zera prądu w jeden model matematyczny. Takiego założenia nie można wprowadzić dla okresu połukowego, dla którego nie występuje lokalna równowaga termodynamiczna, stąd modele matematyczne dla tego okresu są różne od modeli występujących w poprzednich okresach.

Wyróżnić można dwa podstawowe rodzaje modeli analitycznych łuku elektrycznego:

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

Modele kanałowe wyprowadzane są z równań ogólnych opisujących zjawiska hydrodynamiczne i elektryczne w obszarze łuku i jego otoczeniu. Dla modeli tych przyjmuje się, że łuk i jego otoczenie są obszarem o określonych parametrach elektrycznych, hydrodynamicznych i geometrycznych. Modele matematyczne kanałowe pozwalają na obliczanie parametrów miejscowych plazmy łuku i jej otoczenia, takich jak temperatura, prędkość, gęstość gazu i ładunków, średnica łuku i inne [43], [44]. Dzięki temu modele kanałowe łuku umożliwiają optymalizację komory wyładowczej reaktorów plazmowych, ze względu na parametry generowanej plazmy.

Z modeli kanałowych, przy określonych założeniach upraszczających, można wyznaczyć matematyczne modele zaciskowe. Modele te sprowadzają zjawiska fizyczne zachodzące w łuku do zastępczego dwójnika elektrycznego o nieliniowej konduktancji [45]. Modele zaciskowe opisując zmienność konduktancji dla danej konstrukcji komory wyładowczej reaktora umożliwiają obliczanie przebiegów prądów i napięć [46], [47] występujących w czasie pracy reaktora. Tym samym pozwalają wyznaczyć statyczne i dynamiczne charakterystyki zewnętrzne łuku, tzn. zależność napięcia łuku od prądu łuku [48], [49]. Kształt tych charakterystyk nie jest jednakowy dla wszystkich reaktorów plazmowych i zależy od wielu czynników: konstrukcji odbiornika łukowego, ciśnienia gazu roboczego, prądu i napięcia roboczego, rodzaju gazu plazmotwórczego. Oprócz omówionych czynników pewien wpływ na kształt charakterystyk zewnętrznych mają

występujące w napięciu wyższe harmoniczne [50]. Składowe te mogą być wymuszane przez układ zasilania lub powodowane pulsacjami plazmy.

Ponieważ w trójelektrodowych reaktorach plazmowych zasilanych z sieci trójfazowej występuje łuk dynamiczny, więc równaniem wyjściowym dla skonstruowania modelu zaciskowego łuku elektrycznego jest bilans energii łuku dynamicznego [51]:

$$dW = E i dt - P_0 dt = (P - P_0) dt, \quad (3.11)$$

gdzie: dW – przyrost energii łuku, $P dt$ – energia dostarczona do łuku z obwodu elektrycznego, $P_0 dt$ – energia odprowadzana z łuku, E – gradient napięcia łuku, i – prąd łuku.

Z równania 3.11 wynika, że energia akumulowana w wyładowaniu łukowym zmienia się w czasie, i towarzyszą temu zmiany temperatury i przewodności elektrycznej łuku. Przy czym konduktancję dynamiczną jednostki długości kolumny łukowej wyrazić można równaniem:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{E} = \varphi(W), \quad (3.12)$$

gdzie: R – rezystancja jednostki długości kolumny łukowej, i – chwilowa wartość prądu łuku, E – gradient napięcia łuku, W – energia zmagazynowana w czasie dt w jednostce długości kolumny łukowej.

Podstawiając do równania 3.11 zależność 3.12 otrzymuje się równanie:

$$G = \frac{1}{R} = \varphi(W) = \varphi \left[\int_0^t (P - P_0) dt \right]. \quad (3.13)$$

Po zróżniczkowaniu tego równania względem czasu, przemnożeniu przez:

$$R = \frac{E}{i}, \quad (3.14)$$

oraz uwzględnieniu zależności 3.11 i 3.12 otrzymuje się równanie:

$$\frac{1}{i} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dt} = \frac{d\varphi(W)}{dW} (P - P_0) \frac{1}{\varphi(W)}. \quad (3.15)$$

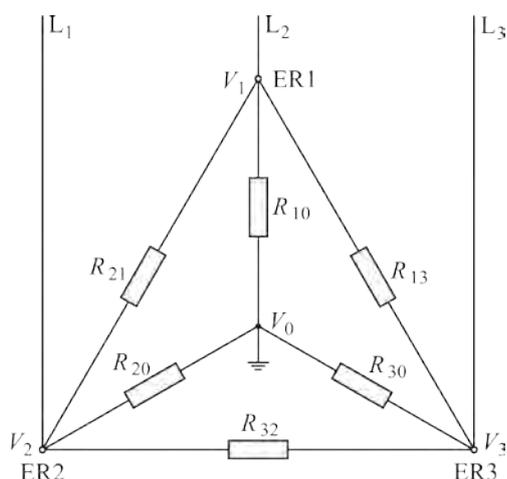
Rozwiązanie równania (3.15) nie jest możliwe bez wprowadzenia założeń upraszczających dotyczących sposobu oddawania energii z łuku elektrycznego. Klasyczne już założenia dotyczące sposobu oddawania energii z łuku zostały opracowane przez Mayra i Cassiego [51], [52], [53], [54].

Mayr przyjął, że temperatura łuku dynamicznego jest zmienna w czasie i przestrzeni oraz że wartość oddawanej objętościowo mocy z jednostki długości łuku jest stała, natomiast Cassie przyjął, że temperatura łuku w dowolnym jego punkcie nie zależy od

czasu, z czego wynika stałość energii zawartej w jednostce objętości łuku a także stałość jego przewodności.

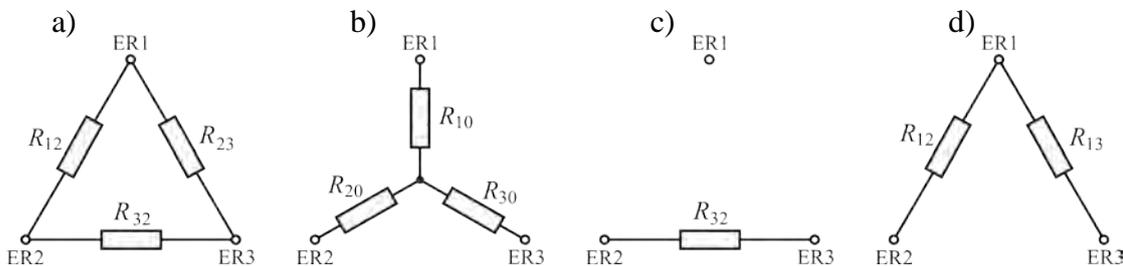
Na podstawie badań i obliczeń stwierdzono, że modele matematyczne łuku zaproponowane przez Mayra i Cassiego nie dają wyników zadowalających dla obliczeń przydatnych w praktyce. Dlatego też prowadzone są ciągłe prace nad ich uściśleniem [55]. Zbliżoną budowę do równań Mayra i Cassiego mają równania łuku dynamicznego zaproponowane przez Urbanca, Schwartza i Theila. We wszystkich opracowanych dotychczas modelach zaciskowych łuku elektrycznego występują wyznaczone z eksperymentu parametry (modele fenomenologiczne), których wartości w znacznym stopniu wpływają na otrzymywane wyniki modelowania, słuszne dla konkretnych rozwiązań i warunków pracy reaktorów plazmowych.

Zjawiska, jakie towarzyszą trójfazowym łukom elektrycznym, są najlepiej poznane i opisane w stalowniczych piecach łukowych [56], [57], [58], [59]. W urządzeniach tych, płonące między końcami elektrod a wsadem pieca, łuki tworzą trójfazowy odbiornik energii elektrycznej połączony w gwiazdę, której punkt neutralny stanowi wsad pieca [60]. Gdy w piecach występują łuki otulone żużłem, wówczas energia doprowadzana do pieca zamienia się na ciepło nie tylko w łukach elektrycznych, ale również na rezystancjach wsadu znajdującego się pomiędzy elektrodami. Rozkład rezystancji pomiędzy elektrodami pracującego pieca stalowniczego przedstawia rysunek 3.20. Rezystancje te, mimo stałego położenia elektrod, ulegają ciągłym zmianom na skutek przemieszczania się łuku po elektrodach oraz ruchów cieplnych ciekłego metalu.



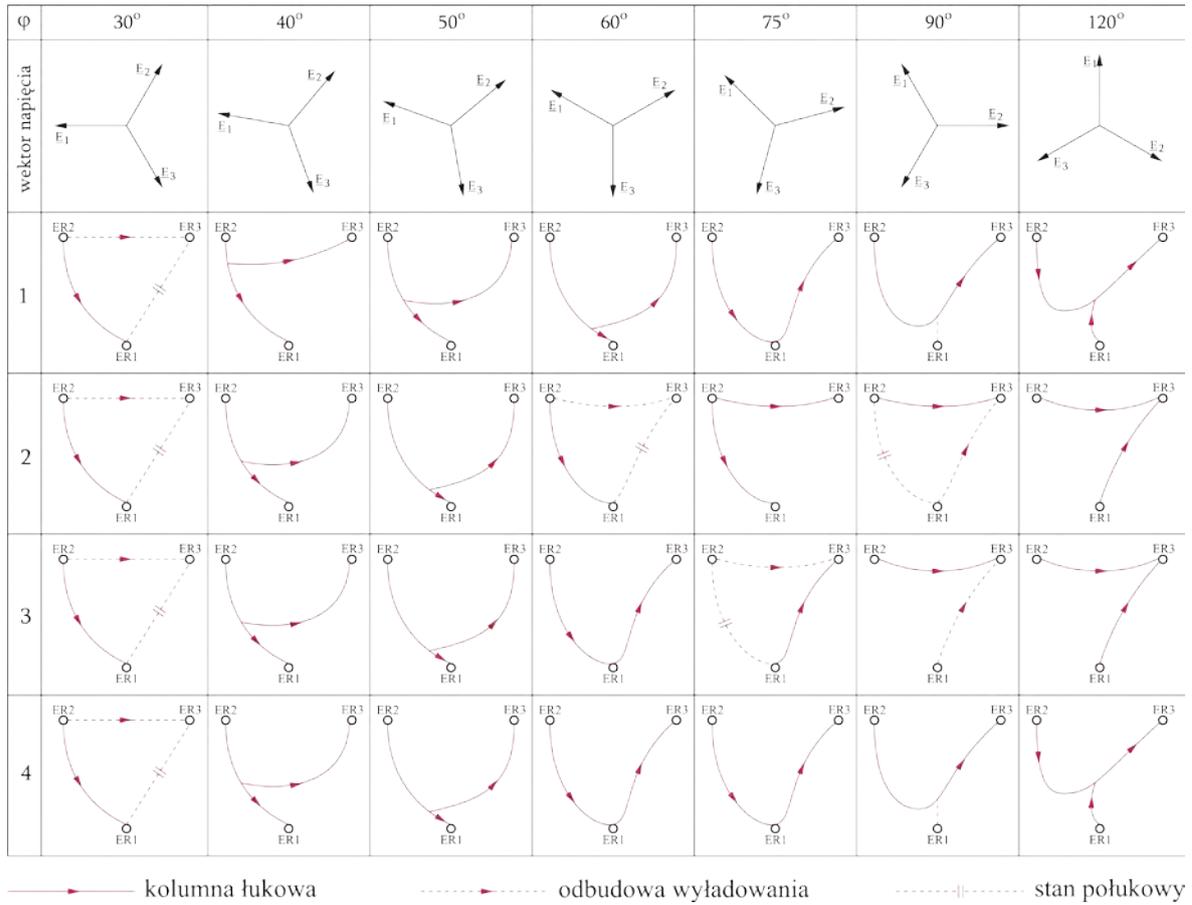
Rys. 3.20. Rezystancje międzyelektrodowe stalowniczego pieca łukowego [60]; R_{10} , R_{20} , R_{30} – rezystancje łuku między elektrodami pieca a jego wsadem, R_{13} , R_{32} , R_{21} – rezystancje wsadu pieca między parami elektrod.

Bardziej skomplikowane, zdecydowanie mniej przewidywalne i dotychczas nieopisane, jest zachowanie się ślizgających się łuków, występujące w trójfazowych reaktorach plazmowych. W konstrukcjach tych urządzeń nie ma obiektu, który mógłby pełnić rolę punktu neutralnego dla palących się łuków. Łuki płoną więc swobodnie między elektrodami otoczone gazem plazmotwórczym. W strefie zapłonu wyładowań, gdzie odległości międzyelektrodowe są najmniejsze, łuki płoną prostopadle do elektrod. Pod naporem gazu plazmotwórczego, skierowanego prostopadle do kolumn łukowych, wyładowania są wydmuchiwane przez siły ciągnące [61], [62]. Duży wpływ na sposób rozwoju wyładowań w plazmotronach łukowych mają również siły Lorentza generowane przez sam łuk jak i prąd elektrod [63].



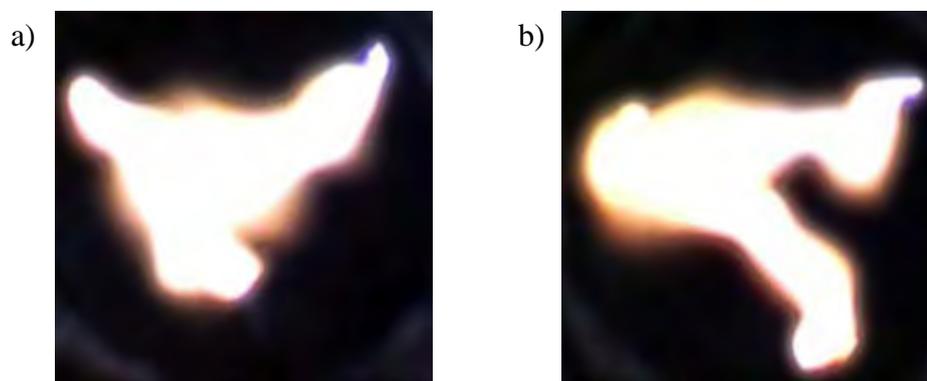
Rys. 3.21. Możliwe konfiguracje łuku swobodnego palącego się w układzie trójfazowym.

Wszystkie wymienione czynniki powodują duże niestabilności, zmienną konfigurację i ukształtowanie łuków [64] palących się w układach trójelektrodowych reaktorów plazmowych. Teoretycznie możliwe do wystąpienia konfiguracje łuku palącego się w układzie trójelektrodowym reaktora plazmowego przedstawiono na rysunku 3.21 [63]. Konfiguracja łuków przedstawiona na rysunku 3.21a, jest teoretycznie możliwa, gdy między jedną lub dwiema parami elektrod występuje wyładowanie łukowe, a pozostałe przerwy międzyelektrodowe są w stanach przejściowych, tj. bądź w stanie występowania kolumny połukowej bądź jej odbudowy. Występowania takiej konfiguracji łuków nie udało się jednak stwierdzić doświadczalnie. Stwierdzono natomiast występowanie konfiguracji łuków przedstawionych na rysunku 3.21b, c i d, jak również zauważono możliwość występowania wzajemnych przejść między tymi konfiguracjami. Najczęściej obserwowanym doświadczalnie układem łuków wydaje się być konfiguracja przedstawiona na rysunku 3.21b, w której łuki tworzą układ gwiazdy z widocznym punktem zerowym. Punkt ten przemieszcza się w przestrzeni międzyelektrodowej tworząc inne konfiguracje łuków, jak to przedstawiono na rysunku 3.22.

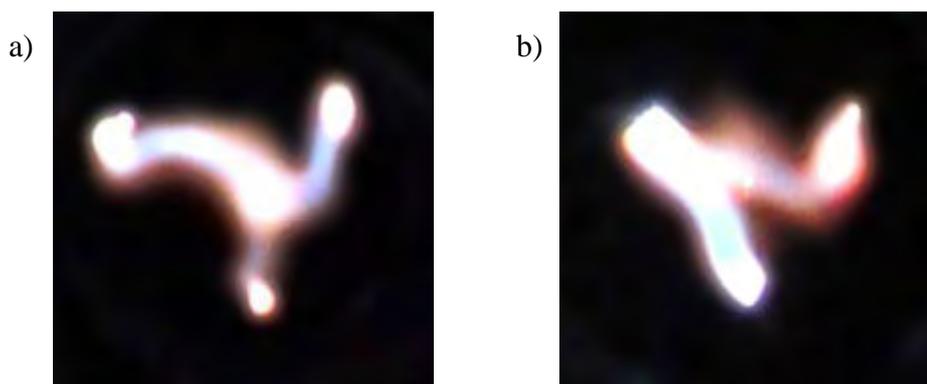


Rys. 3.22. Przykładowe konfiguracje swobodnego łuku trójfazowego i cztery sposoby wzajemnych przejść między nimi [63].

Rysunek 3.22 wykreślono na podstawie zdjęć łuku swobodnego palącego się w układzie trzech elektrod zasilanych z sieci trójfazowej. Wyładowanie następowało w atmosferze argonu, a zdjęcia wykonano z szybkością 3000 klatek/s [63]. Dla porównania na rysunku 3.23 i 3.24 przedstawiono zdjęcia wyładowania łukowego płonącego swobodnie na elektrodach roboczych trójfazowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

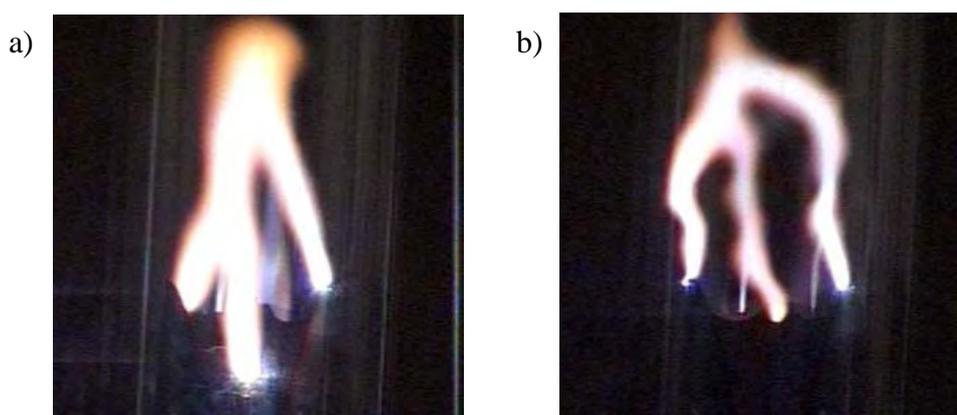


Rys. 3.23. Zdjęcia swobodnego łuku trójfazowego występującego w reaktorze plazmowym widziane z góry (gaz powietrze, napięcie wyładowania $U_f=1,2$ kV, prąd łuku $I_f=3$ A).



Rys. 3.24. Zdjęcia swobodnego łuku trójfazowego występującego w reaktorze plazmowym widziane z góry (gaz argon, napięcie wyładowania $U_f=270$ V, prąd łuku $I_f=2,5$ A).

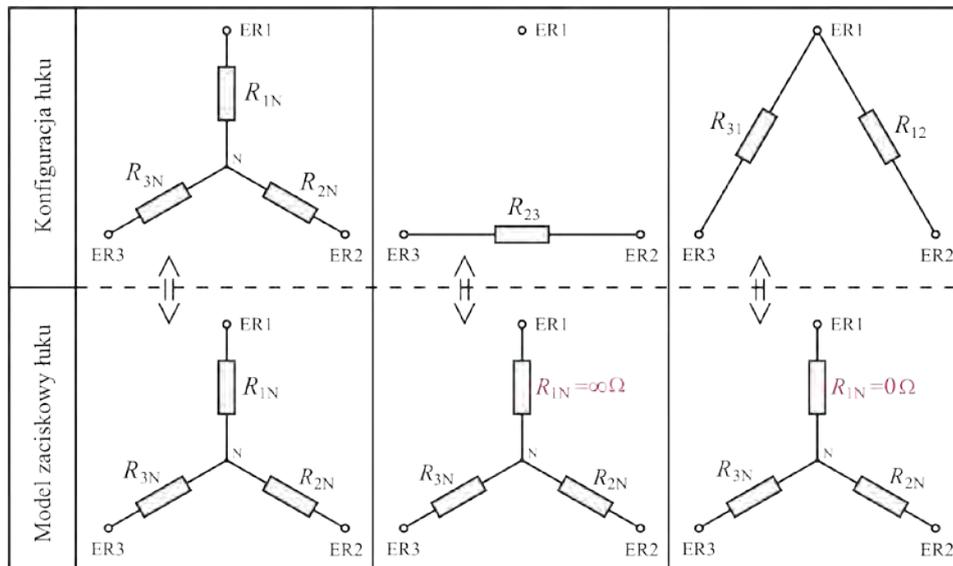
Przedstawione na rysunku 3.23a i 3.24a wyładowania mogą być interpretowane jako układ trzech łuków schodzących się w jednym punkcie zerowym i tworzących układ gwiazdy odpowiadający konfiguracji przedstawionej wcześniej na rysunku 3.21b. Zdjęcia z rysunku 3.23b i 3.24b przedstawiają inną naturę i przypominają charakterem konfigurację łuków przedstawioną na rysunku 3.21d. Przy czym na rysunku 3.24b widoczny jest stan przejściowy wyładowania, objawiający się zanikiem jednego z ramion gwiazdy. Wobec tego wyładowanie z tego rysunku może być także interpretowane jako konfiguracja łuków przedstawiona na rysunku 3.21c. Konfiguracje wyładowań przedstawione na rysunkach 3.23 i 3.24 zachowują swój charakter, nawet mimo znacznego wydłużenia łuków, co przedstawiono na rysunku 3.25.



Rys. 3.25. Zdjęcia swobodnego wyładowania trójfazowego w reaktorze plazmowym widziane z boku; a – zachodzące w powietrzu, b – zachodzące w argonie.

Na podstawie przedstawionego opisu zjawisk można przyjąć założenie upraszczające, że łuki elektryczne płonące w trójfazowym układzie elektrod mogą być reprezentowane przez odbiornik nieliniowy połączony w gwiazdę, jak to przedstawiono na

rysunku 3.26, przy czym, każde z ramion tej gwiazdy może być traktowane jak jednofazowy łuk elektryczny i opisane osobnym modelem zaciskowym.



Rys. 3.26. Konfiguracje łuku trójfazowego i odpowiadające im modele zaciskowe.

4. Układy zasilania odbiorników łukowych

Reaktory plazmowe są odbiornikami o szczególnych cechach i właściwą ich pracę mogą zapewnić tylko specjalne układy zasilania, charakteryzujące się odpowiednimi właściwościami [65]. Do zasilania odbiorników łukowych najkorzystniej jest wykorzystywać źródła o opadającej charakterystyce zewnętrznej [66]. Efekt taki można osiągnąć w ograniczonym zakresie w obwodach zasilających wykorzystujących:

- transformatory konwencjonalne z włączoną dodatkową indukcyjnością,
- transformatory o powiększonej indukcyjności rozproszenia,
- źródła prądu.

Regulacja prądu roboczego w obwodach na bazie specjalnych transformatorów może odbywać się skokowo przez wykorzystanie odczepów w transformatorze lub płynnie za pomocą transduktorów. Postęp w dziedzinie energoelektroniki sprawił, że coraz częściej do zasilania reaktorów plazmowych wykorzystuje się układy przekształtnikowe, które mogą zapewnić, wymaganą przez urządzenia łukowe, charakterystykę prądowo-napięciową i dobre właściwości regulacji prądu, napięcia, mocy i częstotliwości. Zasilacze energoelektroniczne umożliwiają automatyzację reaktora plazmowego, poprzez sterowanie położeniem elektrod, składem gazu plazmotwórczego, czy prędkością przepływu gazu poddawanego obróbce.

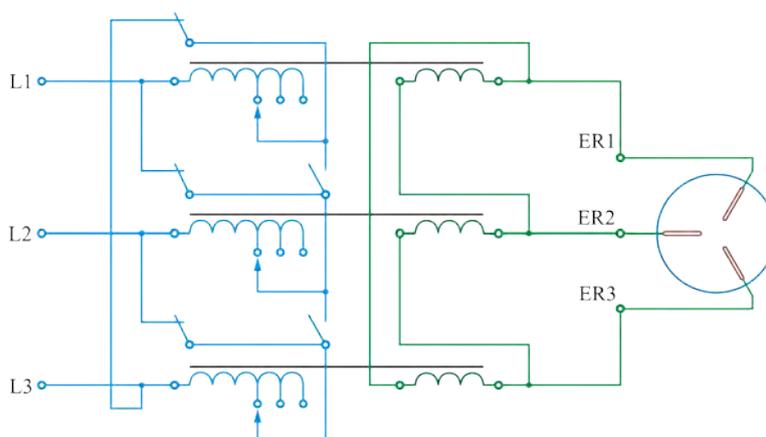
Aby dokonać wyboru układu zasilania do danego procesu plazmowego, należy określić wymagania i parametry odbiornika plazmowego. Opracowując układ zasilania reaktora plazmowego należy brać pod uwagę wiele parametrów i wymagań, z których najważniejsze to:

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

Badania nad układami zasilania reaktorów plazmowych doprowadziły do pewnych uogólnień wyników eksperymentów, ale nie opracowano dotychczas teoretycznych podstaw projektowania źródeł zasilania dla całej klasy łukowych reaktorów plazmowych. W przedstawionym niżej przeglądzie ograniczono się wyłącznie do układów zasilania reaktorów plazmowych z łukiem ekspansyjnym, w tym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

4.1. Układy zasilania wykorzystujące właściwości obwodów magnetycznych

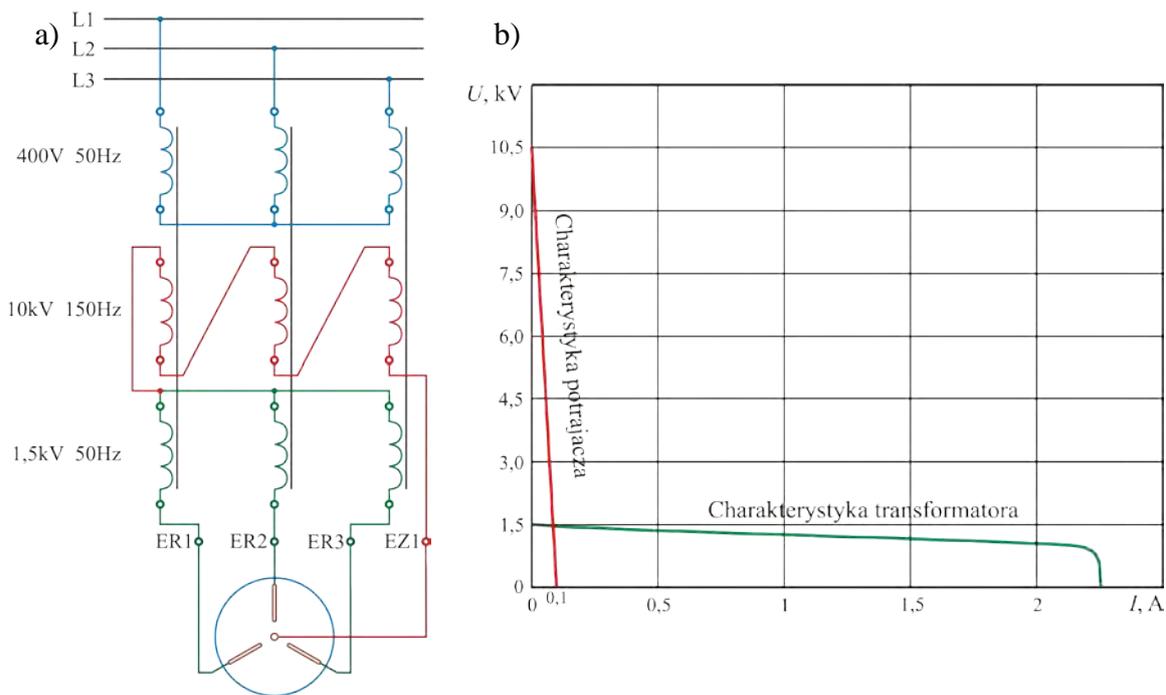
Transformator w odpowiednim wykonaniu jest najprostszym układem zasilania łukowych reaktorów plazmowych. Transformuje on napięcie do wymaganego poziomu, a dzięki specjalnej konstrukcji może ograniczać prąd w obwodzie z wyładowaniem. Stosując różne połączenia transformatorów można zasilać zarówno reaktory plazmowe dwu-, trój-, jak i wieloelektrodowe. Przedstawiony na rysunku 4.1 schemat połączeń transformatora trójfazowego znajduje zastosowanie przy zasilaniu stalowniczych pieców łukowych.



Rys. 4.1. Schemat połączeń transformatora trójfazowego w układzie zasilania stalowniczego pieca łukowego [67].

Uzwojenia transformatora w takich układach łączone są po stronie wtórnej najczęściej w trójkąt zaś uzwojenia pierwotne są przełączalne z trójkąta w gwiazdę i zwykle posiadają odczepy w celu regulacji napięcia wtórnego. Niestabilny łuk elektryczny występujący w piecach łukowych powoduje przeciążenia i zwarcia eksploatacyjne, w których prądy mogą osiągać wartości 2-3 krotnie większe od prądu znamionowego [67], dlatego transformatory mają specjalną konstrukcję i są tak zaprojektowane, by przy długotrwałym pełnym obciążeniu można je było przeciążyć o 100 %, 50 % i 25 % w czasie odpowiednio 5 min, 30 min i 120 minut, a po długotrwałym stanie jałowym o 250 %, 100 %, 50 % i 25 %, odpowiednio, na czas 10 s, 30 min, 60 min i 240 minut. W celu ograniczenia prądów zwarcia eksploatacyjnych stosuje się dodatkowo dławiki włączone w tory prądowe. Dławiki te pracują najczęściej tylko do chwili osiągnięcia stabilnego płonienia łuków, po czym są zwierane, aby nie pogarszały współczynnika mocy urządzenia łukowego.

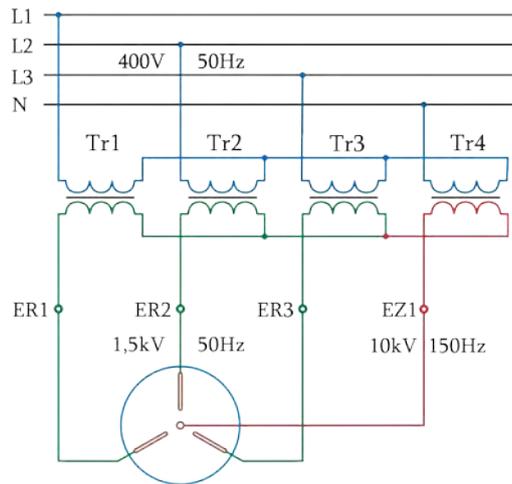
Osobną grupę urządzeń stanowią transformatorowe układy zasilania reaktorów plazmowych z wydzielonymi układami zapłonowymi. W układach tych wykorzystuje się właściwości obwodów magnetycznych w celu oddzielenia funkcji związanych z zapłonem wyładowania od funkcji związanych z jego podtrzymaniem [68], [69]. Przykładem takiego rozwiązania jest system integrujący funkcje magnetycznego mnożnika częstotliwości i transformatora przedstawiony na rysunku 4.2, składający się z trzech jednofazowych transformatorów o rdzeniach stanowiących zamknięte drogi swobodne dla strumienia magnetycznego i jego wyższych harmonicznych.



Rys. 4.2. Zintegrowany układ zasilania wykorzystujący funkcje transformatora i magnetycznego mnożnika częstotliwości; a – układ połączeń, b – charakterystyka zewnętrzna zasilacza.

W rozwiązaniu przedstawionym na rysunku 4.2a, na jednym rdzeniu magnetycznym umieszczono dwa uzwojenia wtórne oraz wspólne dla nich uzwojenie pierwotne [70], [71]. Uzwojenie wtórne połączone w gwiazdę przeznaczone jest do pracy transformatorowej i skonstruowane na napięcie oraz prąd, przy którym reaktor plazmowy pracuje po zapłonie. Drugie uzwojenie wtórne, połączone w otwarty trójkąt, przeznaczone jest do pracy mnożnikowej (jak potrajacz częstotliwości) i musi być zaprojektowane na napięcie wymagane do zapłonu wyładowania oraz mały prąd. Napięcie indukowane trzecią harmoniczną strumienia magnetycznego, indukowane w tym uzwojeniu, maleje od wartości napięcia stanu jałowego do dowolnie niskiej wartości w warunkach obciążenia [72], [73] (miękką charakterystyką prądowo-napięciową). W efekcie, prąd elektrody zapłonowej jest ograniczany w sposób naturalny bez konieczności stosowania dodatkowych dławików. Charakterystykę zewnętrzną układu zintegrowanego przedstawia rysunek 4.2b.

Inne rozwiązanie układu zintegrowanego przedstawia rysunek 4.3 [74], [75]. Jest to układ czterech transformatorów jednofazowych Tr1, Tr2, Tr3 i Tr4. Trzy z nich: Tr1, Tr2 i Tr3 dostarczają energię do elektrod roboczych reaktora plazmowego a ich uzwojenia są połączone w gwiazdę po stronie pierwotnej i wtórnej.



Rys. 4.3. Zintegrowany układ zasilania łukowych reaktorów plazmowych z wydzielonym transformatorem zapłonowym.

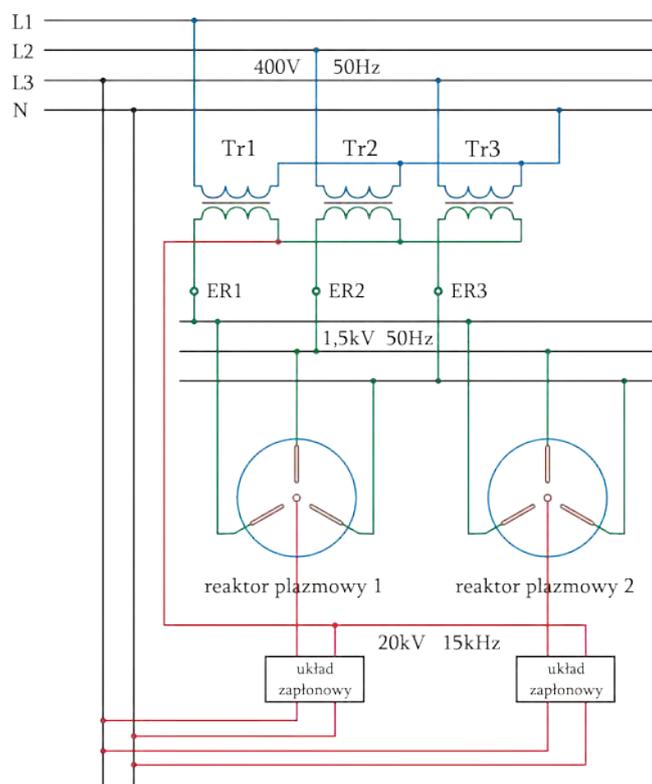
Między punkty gwiazdowe i punkt neutralny sieci zasilającej włączony jest czwarty transformator Tr4, który zasila elektrodę zapłonową reaktora plazmowego. W układzie, między punktem neutralnym sieci i punktem gwiazdowym uzwojeń pierwotnych, czyli na zaciskach uzwojenia pierwotnego transformatora Tr4, występuje różnica potencjałów o dominującej potrójnej częstotliwości, którą wyrazić można równaniem:

$$U_3 = 4kfzAB_3, \quad (4.1)$$

gdzie: k – współczynniki kształtu strumienia magnetycznego, f – częstotliwość sieci zasilającej, z – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego transformatora roboczego, A – pole przekroju poprzecznego magnetowodu, B_3 – trzecia harmoniczna indukcji w rdzeniu transformatora jednofazowego. Transformator Tr4 zasila więc układ zapłonowy reaktora plazmowego napięciem o częstotliwości potrójnej, a charakterystyka zewnętrzna tego transformatora jest tak samo podatna (miękka) jak magnetycznego potrajacza częstotliwości [76], wobec czego napięcie po zapłonie wyładowania maleje do wartości napięcia elektrod roboczych.

Zaletą zintegrowanych układów zasilania jest przede wszystkim naturalna współpraca układu zapłonowego i roboczego oraz charakterystyka zewnętrzna zbliżona do charakterystyki łuku elektrycznego, którą można kształtować na etapie projektowania układu. Pewną wadą takiego układu jest konieczność pracy przy zwiększonej wartości 1. harmonicznej indukcji magnetycznej w rdzeniu transformatora ($B_1=1,8-2$ T), tak aby 3. harmoniczna indukcji B_3 osiągnęła wartość bliską 20 % pierwszej, co zapewnia odpowiednią wartość napięcia zaindukowanego w uzwojeniu zapłonowym. W celu zwiększenia możliwości regulacyjnych układu zasilania (zwykle realizowanych poprzez

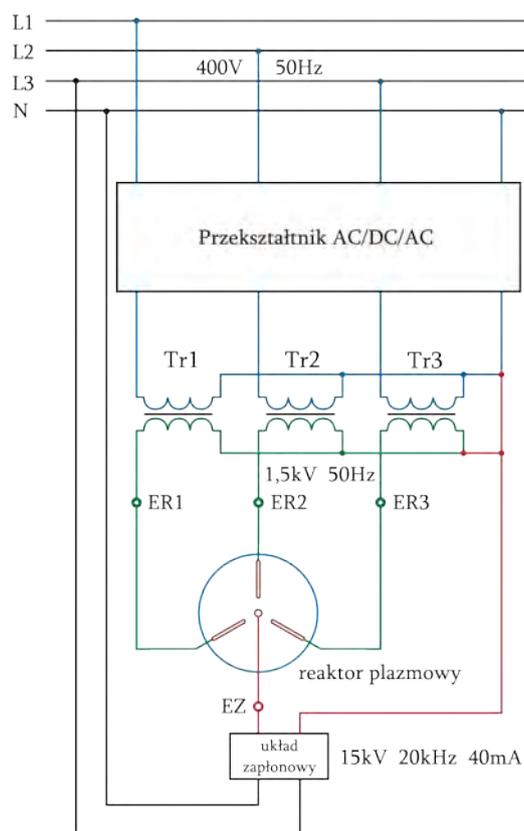
zmiany napięcia zasilającego, a więc także 1. harmonicznej indukcji magnetycznej), czasem zachodzi konieczność całkowitego oddzielenia zapłonu od funkcji związanej z utrzymaniem wyładowania między elektrodami roboczymi. Takie podejście pozwala na większą elastyczność w doborze parametrów zasilania elektrod roboczych reaktora plazmowego i skuteczne działanie, niezależnego układu zapłonowego, często o wysokiej częstotliwości. Procesy technologiczne wymagają niekiedy umiejscowienia obok siebie kilku reaktorów plazmowych pracujących jednocześnie. Wtedy, każdy z reaktorów wymaga osobnego układu zasilania lub przynajmniej własnego układu zapłonowego. Rozwiązanie takie przedstawiono na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Układ zasilania zespołu reaktorów plazmowych z niezależnymi od transformatora głównego układami zapłonowymi.

W systemie tym rola transformatora trójfazowego sprowadza się wyłącznie do zasilania elektrod roboczych pary urządzeń łukowych. Niezależne od siebie układy zapłonowe mogą być wykonane w postaci modułów elektronicznych, co pozwala na zwiększenie częstotliwości napięcia zasilającego układy zapłonowe do wartości 20–40 kHz. Podwyższenie częstotliwości pracy układu zapłonowego wpływa na zmniejszenie jego gabarytów i zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia zapłonu wyładowania.

Wydzielenie układu zapłonowego, jako osobnego obwodu zasilania reaktora plazmowego, umożliwia budowanie układów zasilania z elementami półprzewodnikowymi. Rozwiązanie, przedstawione na rysunku 4.5, w którym istotną część układu zasilania stanowi falownik, ma lepszą dynamikę i możliwość dostosowania parametrów zasilania do zmiennych, wynikających z prowadzonych procesów technologicznych, warunków pracy reaktora, niż systemy transformatorowe.



Rys. 4.5. Schemat układu zasilania z przekształtnikiem AC/DC/AC i oddzielnym obwodem zapłonowym.

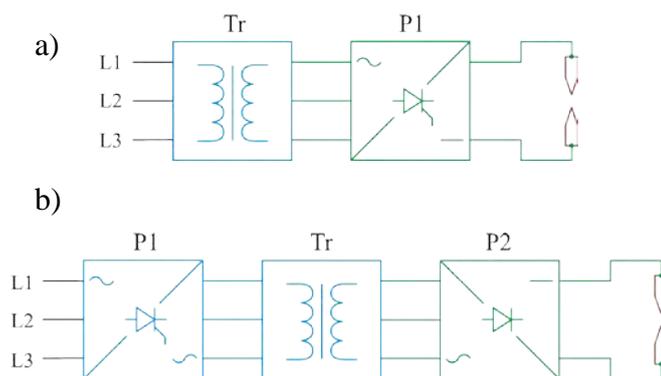
Zastosowanie przekształtnika półprzewodnikowego umożliwia sterowanie wartością napięcia i prądu zasilania elektrod roboczych reaktora plazmowego oraz umożliwia kształtowanie ich przebiegów czasowych, przy czym sterowanie nie ma wpływu na skuteczność działania obwodu zapłonowego. Istotną wadą układów z falownikami jest duża wrażliwość na zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez pracujący reaktor plazmowy.

4.2. Półprzewodnikowe układy zasilania łukowych reaktorów plazmowych

W grupie półprzewodnikowych układów zasilania łukowych reaktorów plazmowych wyróżnić można dwie podstawowe konstrukcje [77]:

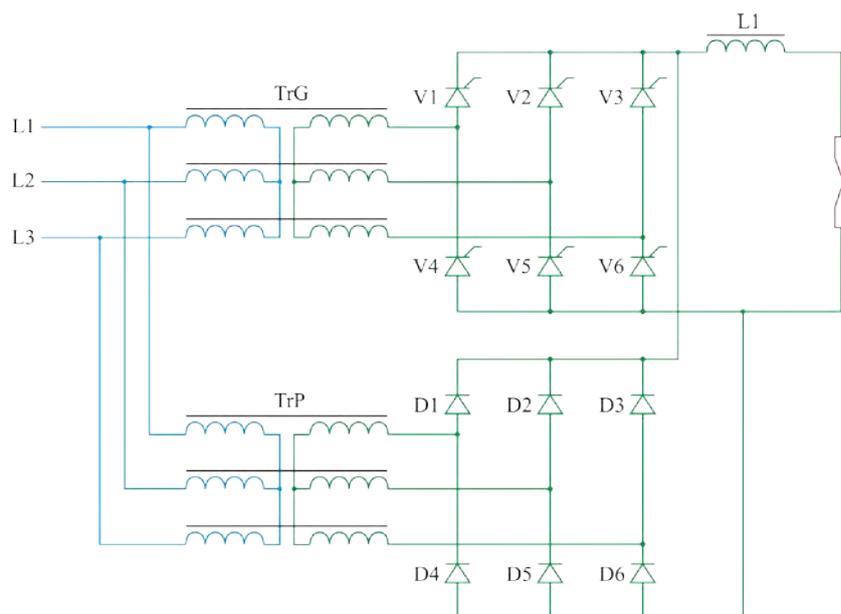
- z mostkiem sterowanym po stronie wtórnej transformatora dopasowującego (rys. 4.6a),
- ze sterownikiem prądu przemiennego po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego (rys. 4.6b).

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



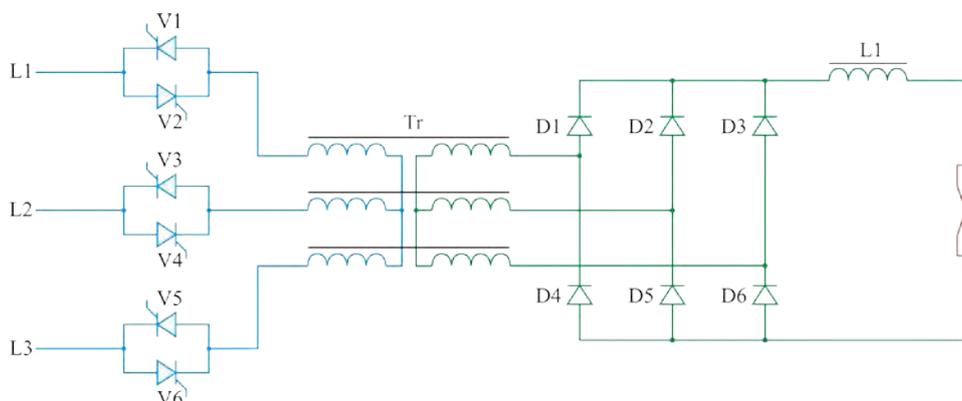
Rys. 4.6. Podstawowe konstrukcje półprzewodnikowych układów zasilania plazmowych reaktorów łukowych; a – układ z mostkiem sterowanym po stronie wtórnej transformatora, b – układ ze sterownikiem prądu przemiennego po stronie pierwotnej transformatora.

Układy z mostkiem sterowanym po stronie wtórnej transformatora znalazły zastosowanie w przemyśle elektrotermicznym do zasilania pieców łukowych i plazmowo-łukowych. Przykładowe rozwiązanie takiej konstrukcji przedstawiono na rysunku 4.7. Jest to układ dwutransformatorowy w którym transformator główny zasila tyrystorowy mostek sześciopulsowy, będący elementem sterującym wartością prądu łuku. Dla ograniczenia indukcyjności w obwodzie z łukiem stosuje się dodatkowe źródło napięcia w postaci niesterowalnego sześciopulsowego mostka diodowego. Mostek ten zasilany jest z dodatkowego transformatora pomocniczego o małej mocy, i tak dobranej reaktancji rozproszenia, by zapewnić intensywne opadanie charakterystyki zewnętrznej. W przypadku, gdy prowadzony proces technologiczny wymaga bardzo wygładzonego prądu wyładowania łukowego, dodatkowo do obwodu wprowadza się dławik, jak przestawiono to na rysunku 4.7.



Rys. 4.7. Układ z mostkiem tyrystorowym i dodatkowym źródłem napięcia.

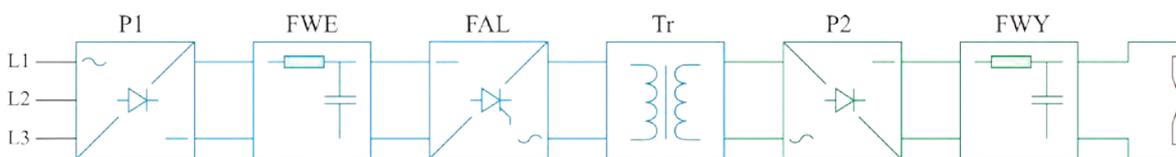
Układ zasilania łukowych reaktorów plazmowych, w którym sterowanie procesem plazmowym i kształtowanie charakterystyki zewnętrznej odbywa się po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego przedstawia rysunek 4.8. W tego typu układach najczęściej we wszystkich trzech fazach po stronie pierwotnej transformatora umieszczone są sterowniki tyrystorowe zaś po stronie wtórnej znajduje się sześciopulsowy mostek diodowy i dławik zapewniający ciągłość prądu i jego wygładzenie. W celu zapewnienia minimalnego prądu wyładowania w obwód po stronie pierwotnej włącza się równoległe do sterowników dodatkowe dławiki a czasem stosuje się wielostopniowe połączenia tego typu, ograniczając w ten sposób pulsacje prądu wyładowania .



Rys. 4.8. Układ ze sterownikiem tyrystorowym po pierwotnej stronie transformatora.

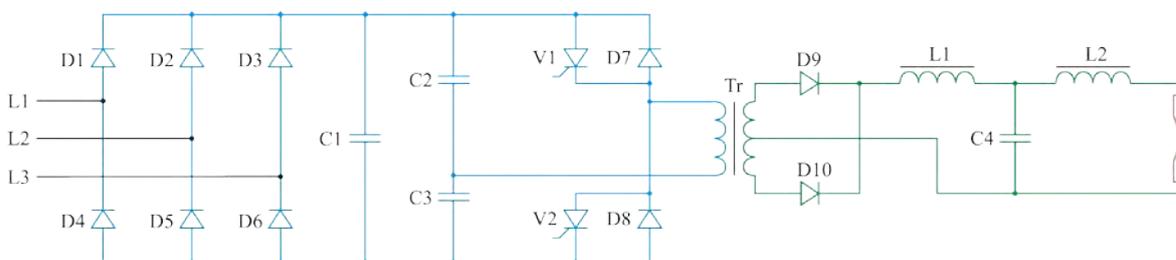
Do podstawowych wad omówionych układów półprzewodnikowych zaliczyć należy przede wszystkim duże rozmiary, co istotnie ogranicza liczbę możliwych zastosowań.

Wady tej pozbawione są półprzewodnikowe układy zasilania odbiorników łukowych z pośredniczącym obwodem podwyższonej częstotliwości. Rozwiązanie takie pozwala również na dokładniejszą regulację prądu wyładowania i polepsza dynamikę układu zasilania. Wprowadzenie obwodu o podwyższonej częstotliwości umożliwia przede wszystkim zmniejszenie masy i objętości elementów indukcyjnych, tj. transformatora dopasowującego i dławika w obwodzie z wyładowaniem. Zwiększa się również sprawność urządzenia ze względu na mniejsze straty w miedzi transformatora. Schemat blokowy omawianego układu przedstawia rysunek 4.9. Główne elementy układu to prostownik, transformator podwyższający i falownik dający na wyjściu napięcie przemiennie o podwyższonej częstotliwości. Częstotliwości stosowane w takich układach zawierają się w granicach od 500 Hz do 20 kHz. Uzyskane z falownika napięcie jest transformowane do wymaganej wartości i następnie kolejny raz prostowane.



Rys. 4.9. Schemat blokowy układu z pośredniczącym obwodem podwyższonej częstotliwości; P1 – prostownik wejściowy, FWE – filtr wejściowy, FAL – falownik, Tr – transformator, P2 – prostownik wyjściowy, FWY – filtr wyjściowy.

Na rysunku 4.10 przedstawiono obwód główny falownika szeregowego z diodami zwrotnymi, jaki znajduje zastosowanie w spawarkach do spawania ręcznego elektrodą otuloną i łukiem krytym.

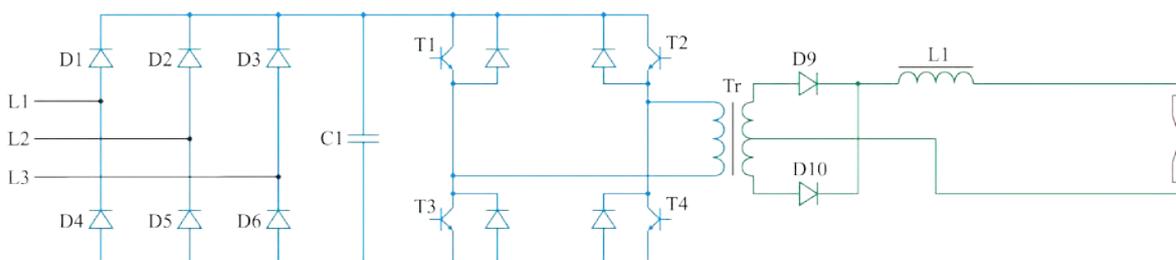


Rys. 4.10. Schemat obwodu głównego zasilacza w układzie falownika prądu z diodami zwrotnymi.

Zaletą układu z rys. 4.10 jest możliwość zwiększania prądu w obwodzie z łukiem przez równoległe łączenie kilku falowników. Odbywa się to jednak kosztem zwiększenia masy urządzenia i skomplikowaniem obwodu sterowania i regulacji. Istotną wadą układu jest występowanie po stronie pierwotnej zasilacza obwodu rezonansowego składającego

się z transformatora i kondensatorów oraz duże wartości skuteczne prądu po stronie pierwotnej, wynikające ze stosowania transformatorów ze szczeliną powietrzną.

Inne rozwiązanie układu zasilania z obwodem pośredniczącym o podwyższonej częstotliwości wykorzystujące w swej konstrukcji falownik o konstrukcji fazowej przedstawia rysunek 4.11. Napięcie wyjściowe tego falownika w niewielkim stopniu zależy od obciążenia, co jest szczególnie korzystne w przypadku zasilania reaktorów plazmowych pracujących z różnymi gazami plazmotwórczymi i przy różnej ich wydajności w zależności od prowadzonego procesu technologicznego. Zaletą układu z rysunku 4.11 jest lepsze wykorzystanie transformatora w porównaniu z innymi układami półprzewodnikowymi, gdyż przenosi on głównie moc czynną. W przypadku, gdy zawory energoelektroniczne układu wykonane są z tranzystorów, do sterowania i regulacji wykorzystuje się komparatory oraz regulatory prądu typu PI, co czyni układ mało skomplikowanym i niezawodnym.



Rys. 4.11. Układ zasilania z falownikiem o komutacji fazowej.

Zaprezentowane układy zasilania odbiorników łukowych z pośredniczącym obwodem o podwyższonej częstotliwości, mimo znacznego skomplikowania, znajdują zastosowanie, przede wszystkim, w technologiach związanych z napyłaniem i natryskiwaniem plazmowym, głównie ze względu na małe rozmiary, które przekładają się na wygodę ich użytkowania.

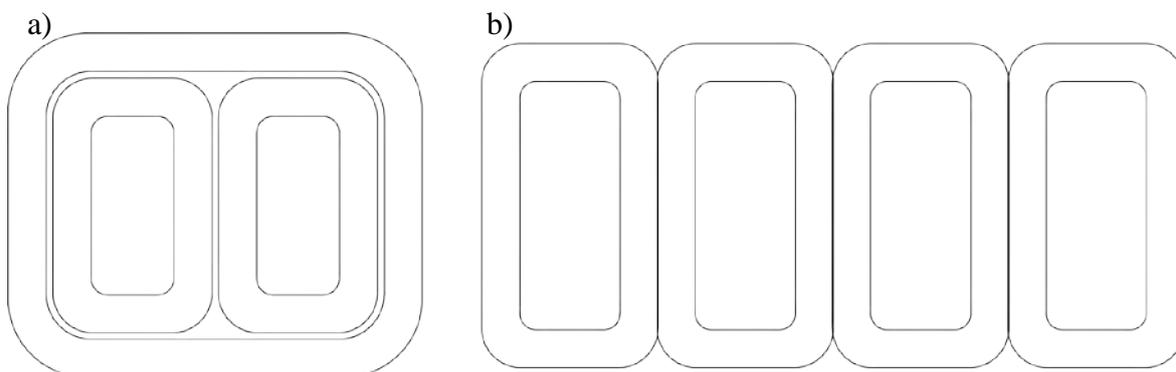
5. Transformator pięciokolumnowy do zasilania łukowych reaktorów plazmowych

Podczas budowy transformatorów wielkich mocy, o dużych gabarytach, niekiedy pojawiają się problemy transportowe. Wtedy koniecznym staje się dostarczenie transformatora w postaci zdemontowanej i montaż w miejscu, w którym transformator ma być eksploatowany. Jest to proces uciążliwy, wymagający stosowania specjalistycznych urządzeń oraz zachowania dużych środków ostrożności, niekiedy w trudnych warunkach polowych. Jednym ze sposobów pozwalających na budowanie względnie

małogabarytowych transformatorów, przy zachowaniu dużej mocy, jest stosowanie konstrukcji pięciokolumnowej rdzenia [78]. Wprowadzenie dodatkowych, zewnętrznych kolumn nieuzwojonych pozwala zmniejszyć powierzchnię przekroju jarzm poziomych i tym samym o ok. 15 % obniżyć wysokość całego transformatora.

Innym pozytywnym efektem stosowania rdzenia pięciokolumnowego jest zmniejszenie strat dodatkowych w rdzeniu i elementach konstrukcyjnych transformatora. Nieuzwojone kolumny zewnętrzne łączą jarzmo górne z jarzmem dolnym transformatora i stanowią dla jednakofazowych strumieni magnetycznych drogę o małej reluktancji. Strumienie te przy konstrukcji trójkolumnowej transformatora zmuszone są do wychodzenia z rdzenia i zamykania się przez powietrze (olej) oraz elementy konstrukcyjne transformatora [79]. Występowanie strumieni jednakofazowych w kolumnach zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego może pociągnąć za sobą silne zniekształcenie gwiazdy napięć fazowych. By tego uniknąć uzwojenia pierwotne lub wtórne łączy się w trójkąt lub po stronie pierwotnej stosuje się połączenie w gwiazdę z przewodem zerowym. Niekiedy też stosuje się specjalnie do tego celu przeznaczone uzwojenia, które łączy się w trójkąt [80], [78].

Obecnie odchodzi się w energetyce od budowy transformatorów wielkiej mocy w wykonaniu pięciokolumnowym. Takie konstrukcje rdzeni powstają natomiast przy budowaniu obwodów magnetycznych trójfazowych transformatorów małej mocy z popularnych rdzeni zwijanych [81], [82], [83], [84], [85]. Wykorzystując rdzenie zwijane można budować trójfazowe transformatory w wykonaniu trójkolumnowym oraz pięciokolumnowym jak przedstawiono to na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Obwody magnetyczne transformatorów trójfazowych wykonane z rdzeni zwijanych.

O ile wykonanie rdzenia trójkolumnowego może nastęrczać pewnych problemów natury technicznej o tyle rdzeń pięciokolumnowy powstaje w sposób naturalny w wyniku

zestawienia czterech rdzeni zwijanych. W efekcie uzyskuje się rdzeń o jednakowym przekroju wszystkich części jarzmowych, równym połowie przekroju kolumny fazowej. Taki stosunek przekrojów jest zgodny z praktyką projektową, gdyż niekiedy nawet buduje się transformatory dużej mocy z takimi właśnie proporcjami przekrojów.

W typowych konstrukcjach transformatorów pięciokolumnowych strumienie magnetyczne zamykające się przez kolumny zewnętrzne nie są wykorzystywane. Strumienie te zamykają się przez niezwojone kolumny, nie oddając na tej drodze energii.

W pracy zaproponowano wykorzystanie energii tych strumieni w trójfazowym transformatorze pięciokolumnowym do zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. W tym celu uzwojono kolumny zewnętrzne transformatora. Ideę tego rozwiązania przedstawia rysunek 5.2. Napięcie, jakie indukuje się w uzwojeniach kolumn zewnętrznych, może być wykorzystane do zasilania układu zapłonowego reaktora plazmowego. Tym sposobem, energia strumieni magnetycznych zamykających się w tych kolumnach wykorzystana zostanie do jonizacji i przebicia przestrzeni międzyelektrodowych reaktora plazmowego.

Zapewnienie niezawodnego zapłonu wyładowania elektrycznego jest podstawą prawidłowej pracy reaktora plazmowego i decyduje o jego możliwościach aplikacyjnych.



Rys. 5.2. Transformator 5-kolumnowy: 1/2 – współśrodkowo nawinięte fazowe uzwojenia pierwotne i wtórne, 3 – uzwojenia wtórne kolumn zewnętrznych.

Przedstawiona na rysunku 5.2 konstrukcja transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi przeznaczona jest do zasilania łukowych reaktorów plazmowych różnych typów, a w szczególności wieloelektrodowych reaktorów plazmowych z wydzielonymi układami zapłonowymi. Podobnie jak omówione wcześniej układy zintegrowane, taki specjalny transformator musi realizować podstawowe funkcje zasilacza, do których należą:

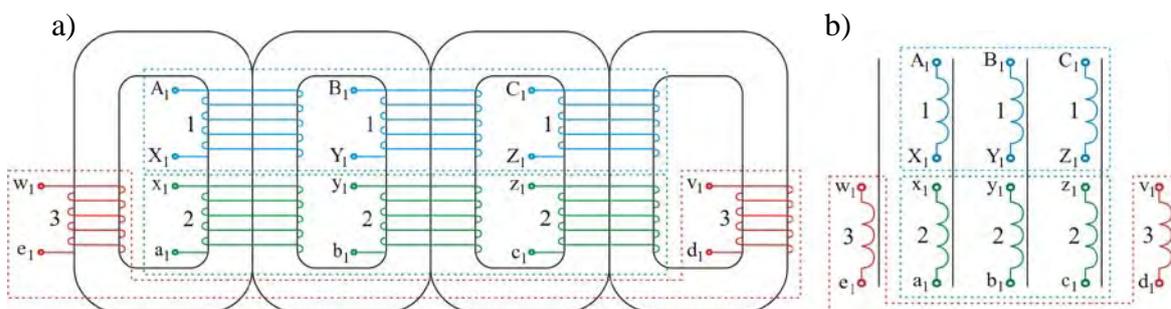
- zapłon wyładowania elektrycznego,
- podtrzymanie wyładowania elektrycznego między elektrodami roboczymi,
- zapewnienie cyklicznej pracy reaktora plazmowego,
- ograniczenie wartości prądu zwarcia.

Różnice, jakie występują między układem zintegrowanym a układem z transformatorem pięciokolumnowym dotyczą sposobu realizacji wymienionych funkcji. W układach zintegrowanych funkcje związane z podtrzymaniem wyładowania oraz ograniczeniem prądu pełnią odpowiednio zaprojektowane transformatory jednofazowe o swobodnych drogach powrotnych dla strumienia magnetycznego. Natomiast wstępna jonizacja i przebite przestrzeni międzyelektrodowych realizowane są przez dodatkowy transformator małej mocy, bądź może być realizowana przez układ elektroniczny, jak to ma miejsce w przypadku układów zasilania z falownikami. W proponowanej konstrukcji transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi wszystkie wymienione zadania są realizowane w jednym urządzeniu.

Analizując konstrukcję układu zasilania można wyróżnić w nim dwa obwody wtórne (rys. 5.3):

- obwód dostarczający moc do reaktora łukowego,
- obwód zapłonu wyładowania,

które pracują niezależnie i zasilają elektrody robocze i elektrody zapłonowe reaktora plazmowego.



Rys. 5.3. Uzwojenia kolumn transformatora pięciokolumnowego (a) i jego schemat elektryczny (b): 1 – uzwojenia pierwotne, 2 – uzwojenia wtórne, 3 – uzwojenia zapłonowe.

Moc do reaktora plazmowego dostarczana jest przez obwód uzwojeń wtórnych, umieszczonych na kolumnach fazowych, który zasila elektrody robocze reaktora plazmowego napięciem o wartości wymaganej dla prowadzonego procesu plazmowego. Ograniczenie prądu zwarcia wymaga kształtowania charakterystyki zewnętrznej transformatora poprzez dobór reaktancji rozproszenia, a więc odpowiednią budowę

Uzwojenia kolumn zewnętrznych (zapłonowe) mogą pracować jako niezależne, bądź być łączone szeregowo lub równoległe (rys. 5.4). Łączenie szeregowo pozwala na zwiększenie wartości napięcia zapłonowego, równoległe umożliwia zwiększenie prądu iskry zapłonowej, a praca niezależna umożliwia zasilanie dwóch reaktorów z elektrodami zapłonowymi. Podkreślić należy, że jakiegokolwiek zmiany połączeń uzwojeń kolumn zewnętrznych wymagają przeanalizowania konstrukcji transformatora pod względem jego wytrzymałości elektrycznej oraz zmian jego parametrów, które będą wpływać na charakterystyki elektryczne i ciepłno-fizyczne reaktora plazmowego.

5.1. Przekładnia dodatkowa transformatora

Transformator pięciokolumnowy z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi, ze względu na swoją konstrukcję z dwoma obwodami zasilania: elektrod roboczych i elektrody zapłonowej, posiada dwie przekładnie:

- przekładnię główną \mathcal{G} między pierwotnym i wtórnym uzwojeniem fazowym,
- przekładnię dodatkową \mathcal{G}_s między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem wtórnym nawiniętym na kolumnie zewnętrznej transformatora.

Zgodnie z teorią transformatorów przekładnia główna \mathcal{G} wyrażona jest zależnością:

$$\mathcal{G} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (5.1)$$

Przekładnię dodatkową \mathcal{G}_s , między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej transformatora, można wyznaczyć korzystając z zależności na napięcia indukowane w uzwojeniach transformatora. Zakładając, że w obwodzie pierwotnym o z_1 zwojach indukuje się siła elektromotoryczna:

$$E_1 = 4,44 f z_1 \Phi_1, \quad (5.2)$$

oraz, odpowiednio, w uzwojeniu kolumny zewnętrznej o z_s zwojach, indukowana siła elektromotoryczna wynosi:

$$E_s = 4,44 f z_s \Phi_s, \quad (5.3)$$

Dzieląc przez siebie stronami równania 5.2 i 5.3, otrzymuje się zależność na przekładnię napięciową \mathcal{G}_{su} transformatora:

$$\mathcal{G}_{su} = \frac{E_s}{E_1} = \frac{4,44 f z_s \Phi_s}{4,44 f z_1 \Phi_1} = \frac{z_s \Phi_s}{z_1 \Phi_1} = \mathcal{G}_{sz} \frac{\Phi_s}{\Phi_1}, \quad (5.4)$$

w której \mathcal{G}_{S_z} jest przekładnią zwojową między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej transformatora zaś Φ_S i Φ_1 są strumieniami zamykającymi się, odpowiednio, w kolumnie zewnętrznej oraz w kolumnie fazowej transformatora. Zależność 5.4 można wyrazić poprzez indukcję B_K w kolumnie fazowej, indukcję B_S w kolumnie zewnętrznej oraz przekroje tych kolumn A_K i A_S :

$$\mathcal{G}_{S_u} = \mathcal{G}_{S_z} \frac{A_S B_S}{A_K B_K}. \quad (5.5)$$

Jak wynika z relacji 5.5 przekładnia napięciowa \mathcal{G}_{S_u} zależy od liczby zwojów obu uzwojeń oraz od wzajemnych proporcji przekrojów poszczególnych fragmentów rdzenia transformatora i występujących w nich indukcji magnetycznych. Dobierając przekroje oraz długości kolumn i jarzm obwodu magnetycznego transformatora pięciokolumnowego można kształtować rozkład indukcji w rdzeniu, a tym samym wpływać na wartość przekładni napięciowej \mathcal{G}_{S_u} .

Korzystając z zależności na moc pozorną można wyprowadzić zależność na przekładnię prądową \mathcal{G}_{S_i} między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej transformatora pięciokolumnowego. Należy zauważyć, że w tym przypadku moc pozorna uzwojenia pierwotnego nie jest równa mocy pozornej uzwojenia kolumny zewnętrznej:

$$S_K \neq S_S. \quad (5.6)$$

Wyrażając moc pozorną uzwojenia pierwotnego zależnością:

$$S_K = U_1 I_1 = 4,44 f z_1 \Phi_1 I_1 = 4,44 f z_1 B_K A_K I_1, \quad (5.7)$$

moc pozorną uzwojenia kolumny zewnętrznej zależnością:

$$S_S = U_S I_S = 4,44 f z_S \Phi_S I_S = 4,44 f z_S B_S A_S I_S, \quad (5.8)$$

następnie dzieląc zależności 5.7 i 5.8 stronami, otrzymuje się równanie, z którego wyznaczyć można przekładnię prądową między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej transformatora:

$$\frac{S_S}{S_1} = \frac{4,44 f z_S B_S A_S I_S}{4,44 f z_1 B_K A_K I_1} = \frac{z_S}{z_1} \cdot \frac{B_S A_S}{B_K A_K} \cdot \frac{I_S}{I_1} = \mathcal{G}_{S_z} \cdot \frac{B_S A_S}{B_K A_K} \cdot \frac{I_S}{I_1}. \quad (5.9)$$

Przekształcając zależność 5.9 otrzymuje się wzór na przekładnię prądową w postaci:

$$\mathcal{G}_{S_i} = \frac{I_1}{I_S} = \mathcal{G}_{S_z} \cdot \frac{B_S A_S}{B_K A_K} \cdot \frac{S_K}{S_S}, \quad (5.10)$$

który można uprościć korzystając ze wzoru Richtera:

$$A_K = C_K \sqrt{\frac{S_K}{f}} \text{ dla kolumny fazowej,} \quad (5.11)$$

$$A_S = C_S \sqrt{\frac{S_S}{f}} \text{ dla kolumny zewnętrznej,} \quad (5.12)$$

gdzie C ma w przybliżeniu wartość stałą, wynoszącą dla transformatorów małej i średniej mocy $C=(3,6-5,5) \cdot 10^{-4}$. Korzystając z zależności 5.11 i 5.12 oraz wprowadzając współczynnik wzmocnienia przekroju jarzma wyrażony zależnością:

$$\beta = \frac{B_K}{B_S} = \frac{A_K}{A_S}. \quad (5.13)$$

Wzór 5.10 można uprościć do postaci:

$$\mathcal{G}_{Si} = \frac{I_K}{I_S} = \mathcal{G}_{Sz} \cdot \frac{B_S A_S}{B_K A_K} \cdot \frac{S_K}{S_S} = \mathcal{G}_{Sz} \cdot \frac{B_S A_S}{B_K A_K} \cdot \frac{f \frac{A_K^2}{C_K^2}}{f \frac{A_S^2}{C_S^2}} = \mathcal{G}_{Sz} \cdot \frac{B_S}{B_K} \cdot \frac{A_K}{A_S} = \mathcal{G}_{Sz} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \beta = \mathcal{G}_{Sz}. \quad (5.14)$$

Przy założeniu stałych współczynników C we wzorze Richtera, $C_K=C_S$, ze wzoru 5.14 wynika, że przekładnia prądowa \mathcal{G}_{Si} oraz przekładnia zwojowa \mathcal{G}_{Sz} , które występują między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej transformatora pięciokolumnowego są sobie równe. Natomiast przekładnie te nie są równe przekładni napięciowej (wzór 5.5), jaka występuje między tymi uzwojeniami:

$$\mathcal{G}_{Sz} = \mathcal{G}_{Si} \neq \mathcal{G}_{Su}. \quad (5.15)$$

Zależności do wyznaczania przekładni występujących między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej transformatora pięciokolumnowego zestawiono w tabelicy 10.

Tablica 10. Przekładnie transformatora pięciokolumnowego między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej.

Zwojowa	Napięciowa	Prądowa
$\mathcal{G}_{Sz} = \frac{z_S}{z_1}$	$\mathcal{G}_{Su} = \frac{U_S}{U_1} = \mathcal{G}_{Sz} \frac{A_S B_S}{A_K B_K}$	$\mathcal{G}_{Si} = \frac{I_1}{I_S} = \mathcal{G}_{Su} \frac{S_K}{S_S}$

5.2. Model transformatora pięciokolumnowego

Rozpływ strumieni w poszczególnych fragmentach obwodu magnetycznego trójfazowego transformatora pięciokolumnowego jest jednym z czynników decydujących o możliwości wykorzystania tej konstrukcji transformatora do zasilania łukowych reaktorów plazmowych wyposażonych w układy zapłonowe. Aby przeanalizować wartość i kształt napięcia indukowanego w uzwojeniu kolumny zewnętrznej, zbudowano a następnie przebadano pięciokolumnowy obwód magnetyczny wykonany z rdzeni zwijanych i przecinanych. Rozpatrzono dwa podstawowe stany pracy uzwojeń przeznaczonych do zasilania elektrody zapłonowej:

- stan jałowy, który występuje przy procesach jonizacji lub dejonizacji przerw między-elektrodowych reaktora plazmowego,
- stan zwarcia, odpowiadający iskrze elektrycznej, która zapala wyładowanie główne między elektrodami roboczymi.

Model transformatora pięciokolumnowego zbudowany do badań eksperymentalnych wyposażono tylko w uzwojenia pierwotne oraz uzwojenie nawinięte na kolumnie zewnętrznej, przeznaczone docelowo do zasilania obwodu zapłonowego. Zdjęcie modelu przedstawiono na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Model transformatora pięciokolumnowego z uzwojeną kolumną zewnętrzną.

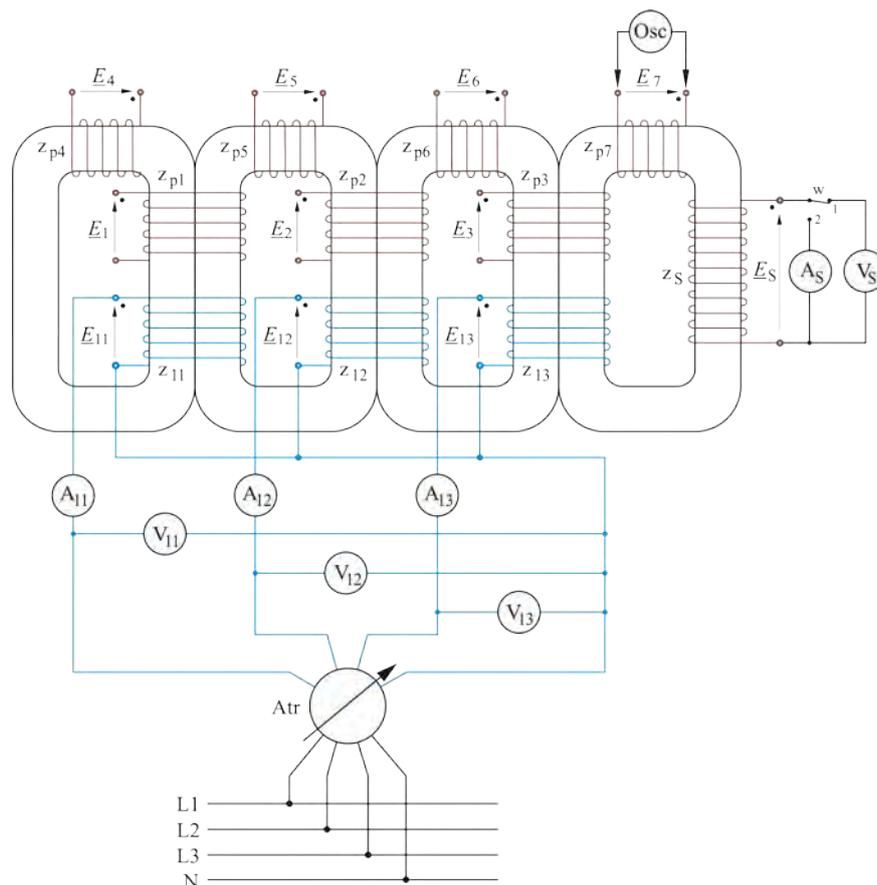
W konstrukcji obwodu magnetycznego wykorzystano rdzenie z taśm anizotropowych ET o symbolu RZC-35/100-30. Liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego dobrano tak, by w trakcie realizowania pomiarów można było wprowadzić obwód magnetyczny transformatora w stan nasycenia. Parametry techniczne modelu transformatora zestawiono w tabelicy 11. W częściach jarzmowych transformatora oraz na kolumnach fazowych nawinięto uzwojenia pomiarowe. Mierząc napięcia indukowane

w tych uzwojeniach wyciągnięto wnioski o rozplywie strumieni w poszczególnych fragmentach obwodu magnetycznego.

Tablica 11. Parametry techniczne modelu transformatora.

Liczba zwojów uzwojenia pierwotnego	–	380
Liczba zwojów uzwojenia kolumny zewnętrznej	–	1036
Liczba zwojów uzwojenia pomiarowego	–	40
Przekrój kolumn fazowych	m ²	1,2·10 ⁻³
Przekrój kolumn zewnętrznych	m ²	0,6·10 ⁻³
Przekrój jarzm	m ²	0,6·10 ⁻³

Układ pomiarowy do badania rozplywu strumieni przedstawia rysunek 5.6. Składa się on z badanego obiektu zasilanego przez autotransformator, zespołu przyrządów pomiarowych po stronie pierwotnej i w uzwojeniu kolumny zewnętrznej oraz oscyloskopu.



Rys. 5.6. Układ pomiarowy do badania rozplywu strumieni w rdzeniu transformatora pięciokolumnowego.

Przy zasilaniu modelu transformatora napięciem fazowym o wartości 140 V napięcie stanu jałowego, zaindukowane w uzwojeniu kolumny zewnętrznej transformatora, miało wartość 175 V. Daje to wartości indukcji:

$$B_K = \frac{E_1}{4,44 \cdot z_1 \cdot f \cdot A_K} = \frac{140}{4,44 \cdot 380 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}} = 1,38 \text{ T}, \quad (5.16)$$

$$B_S = \frac{E_S}{4,44 \cdot z_S \cdot f \cdot A_S} = \frac{175}{4,44 \cdot 1036 \cdot 50 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}} = 1,27 \text{ T}, \quad (5.17)$$

odpowiednio w kolumnach fazowych oraz w kolumnie zewnętrznej oraz przekładnię napięciową między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej równą:

$$g_{Su} = \frac{E_S}{E_1} = \frac{175}{140} = 1,25. \quad (5.18)$$

W stanie zwarcia uzwojenia kolumny zewnętrznej modelu transformatora, prąd w tym uzwojeniu ma wartość $I_S=1,06$ A. Natomiast wartości prądów pierwotnych są różne w poszczególnych fazach i wynoszą: $I_{11}=0,09$ A dla fazy najbardziej odległej od zwartego uzwojenia kolumny zewnętrznej transformatora, $I_{12}=1,02$ A dla fazy środkowej i $I_{13}=2,95$ A dla fazy najbliższej zwartemu zwojeniu kolumny zewnętrznej. Wyliczona wartość przekładni prądowej między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej, z uwzględnieniem największej wartości prądu strony pierwotnej, wynosi:

$$g_{Si} = \frac{I_{13}}{I_S} = \frac{2,95}{1,06} = 2,7. \quad (5.19)$$

Pomiary modelu transformatora oraz wartości wszystkich przekładni: napięciowej, prądowej i zwojowej, występujących w badanej konstrukcji zebrano w tablicach 12 i 13.

Tablica 12. Zestawienie pomiarów.

Stan jałowy		Stan zwarcia uzwojenia kolumny zewnętrznej			
U_{11}	U_S	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_S
V	V	A	A	A	A
140	175	0,09	1,02	2,95	1,06

Tablica 13. Przekładnie transformatora między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej.

Zwojowa	Napięciowa	Prądowa
$g_{Sz} = \frac{z_S}{z_1}$	$g_{Su} = \frac{U_S}{U_1}$	$g_{Si} = \frac{I_1}{I_S}$
2,7	1,25	2,7

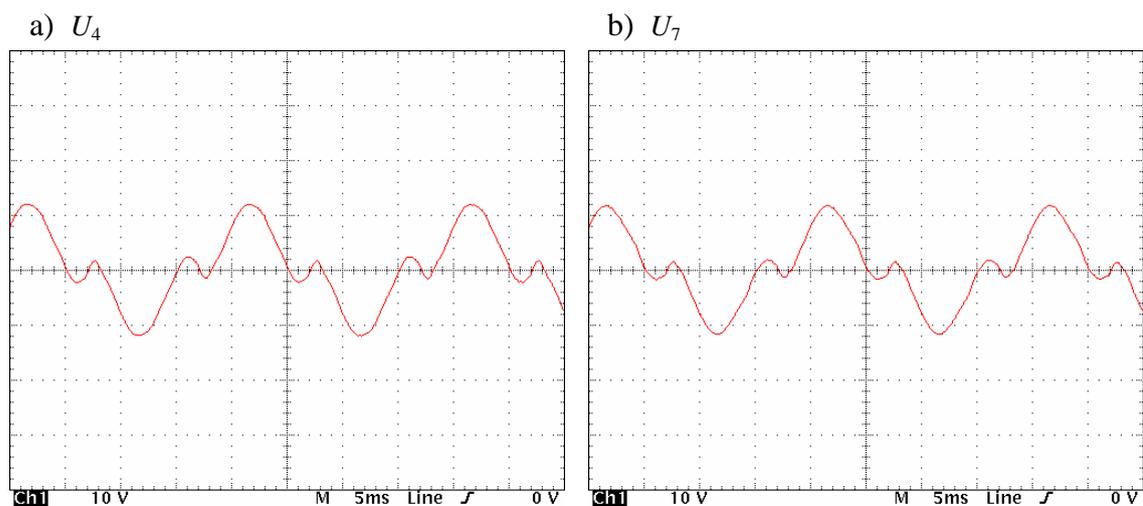
Na podstawie uzyskanych z pomiarów przekładni między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej modelu transformatora pięciokolumnowego można stwierdzić, że wyprowadzone w rozdziale 5.1 relacje są słuszne a obliczone z nich przekładnie pokrywają się z uzyskanymi na drodze pomiarowej (tablica 13). Przekładnia napięciowa \mathcal{G}_{Su} wyliczona z zależności 5.5 wynosi:

$$\mathcal{G}_{Su} = \frac{U_s}{U_1} = \mathcal{G}_{Sz} \frac{A_s B_s}{A_K B_K} = 2,7 \cdot \frac{0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,27}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,38} = 1,25, \quad (5.20)$$

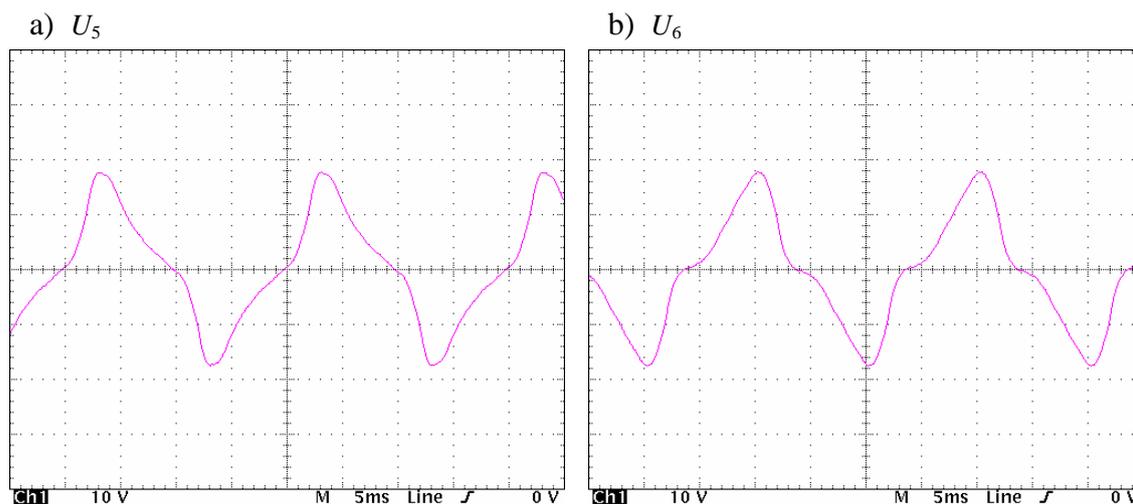
zaś przekładnia prądowa \mathcal{G}_{Si} równa jest przekładni zwojowej \mathcal{G}_{Sz} i zgodnie z zależnością 5.14 jest równa:

$$\mathcal{G}_{Si} = \mathcal{G}_{Sz} = \frac{z_s}{z_1} = \frac{1036}{380} = 2,7. \quad (5.21)$$

O możliwości wykorzystania transformatora z uzwojeniami kolumnami zewnętrznymi do zasilania reaktorów plazmowych z układami zapłonowymi decydują przede wszystkim charakterystyki napięć indukowanych w uzwojeniach kolumn zewnętrznych. Napięcia te w stanie jałowym pracy modelu transformatora przedstawione są na rysunku 5.7a i 5.7b. Na podstawie tych oscylogramów stwierdzono, iż mimo znacznego odkształcenia przez wyższe harmoniczne, napięcia indukowane w uzwojeniach kolumn zewnętrznych transformatora umożliwiają jonizację i przebicie przestrzeni międzyelektrodowych, występujących w układach zapłonowych reaktorów plazmowych oraz zainicjowanie właściwego wyładowania na elektrodach roboczych urządzenia łukowego. Dodatkowo na rysunku 5.8 przedstawiono napięcia indukowane w jarzmach modelu transformatora w stanie jałowym jego pracy.

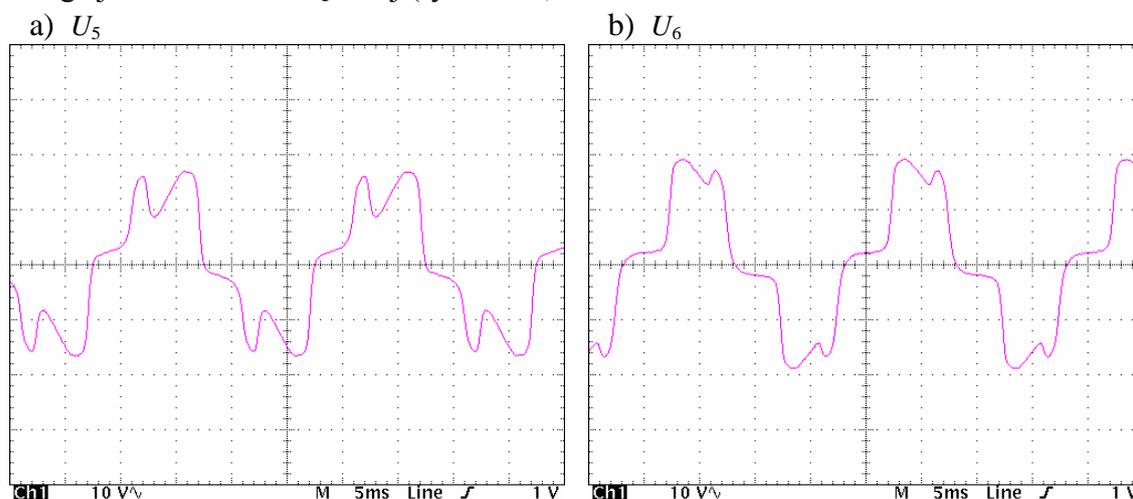


Rys. 5.7. Oscylogramy napięć indukowanych w uzwojeniach pomiarowych z_4 i z_7 nawiniętych na kolumnach zewnętrznych transformatora w stanie jałowym jego pracy: a – uzwojenie z_4 , b – uzwojenie z_7 .

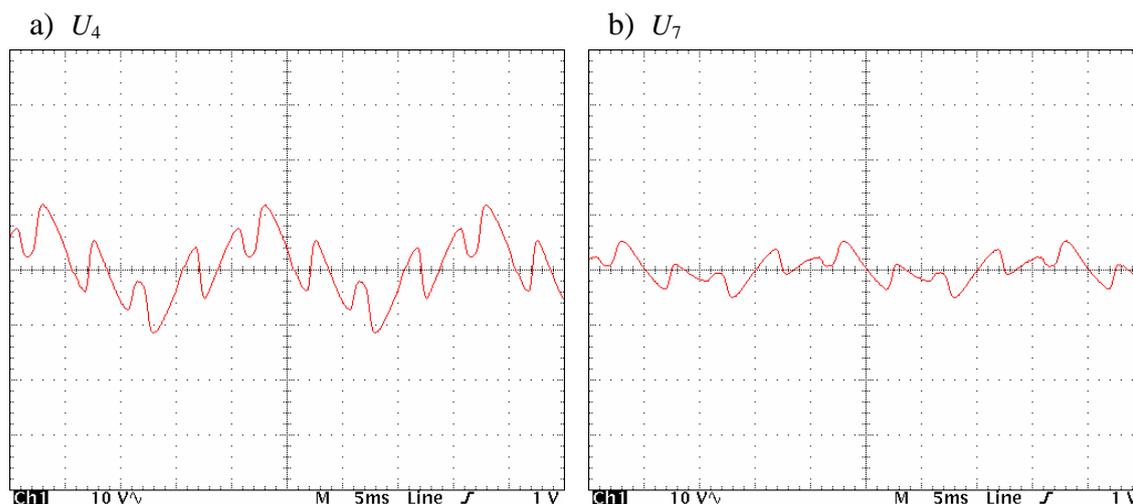


Rys. 5.8. Oscylogramy napięć indukowanych w uzwojeniach pomiarowych z_5 i z_6 nawiniętych na jarzmach transformatora w stanie jałowym jego pracy: a – uzwojenie z_5 , b – uzwojenie z_6 .

Z punktu widzenia możliwości wykorzystania uzwojenia kolumny zewnętrznej transformatora do zasilania układów zapłonowych reaktorów plazmowych istotnym zagadnieniem jest wpływ jaki wywiera zwarcie tego uzwojenia na rozptył strumieni w poszczególnych fragmentach obwodu magnetycznego. Z oscylogramów przedstawionych na rysunku 5.9 wynika, że efektem zwarcia uzwojenia kolumny zewnętrznej jest silne odkształcenie przebiegów strumieni w jarzmach transformatora, co z kolei przekłada się na odkształcenie napięć indukowanych w uzwojeniach obu kolumn zewnętrznych (rys. 5.10). Z pomiarów napięć indukowanych w uzwojeniach pomiarowych wynika, że największemu odkształceniu ulega strumień w kolumnie zewnętrznej, na której uzwojenie zostało zwarte (rys. 5.10b), ale też silnie odkształca się też strumień w drugiej kolumnie zewnętrznej (rys. 5.10a).

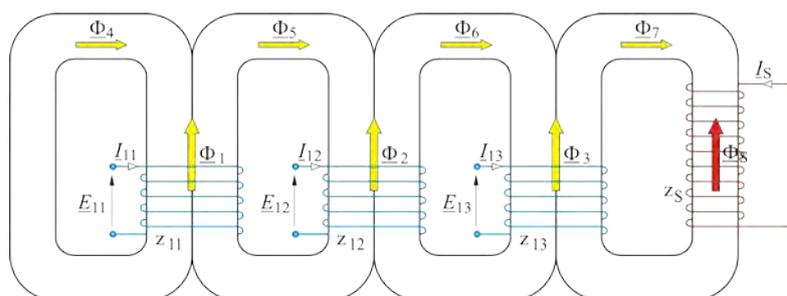


Rys. 5.9. Oscylogramy napięć indukowanych w uzwojeniach pomiarowych z_5 i z_6 nawiniętych na jarzmach transformatora w stanie zwarcia uzwojenia z_5 kolumny zewnętrznej transformatora: a – uzwojenie z_5 , b – uzwojenie z_6



Rys. 5.10. Oscylogramy napięć indukowanych w uzwojeniach pomiarowych z_4 i z_7 nawiniętych na kolumnach zewnętrznych transformatora w stanie zwarcia uzwojenia z_S kolumny zewnętrznej transformatora: a – uzwojenie z_4 , b – uzwojenie z_7 .

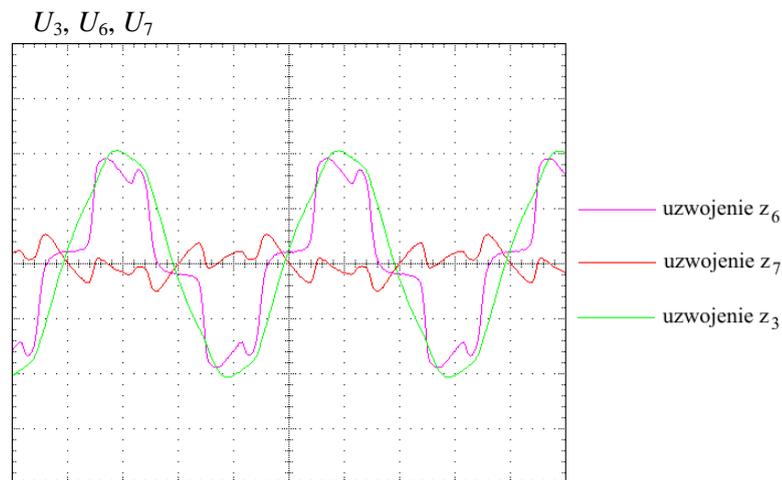
Odształcenie strumieni zamykających się przez kolumny zewnętrzne transformatora pięciokolumnowego, jakie ma miejsce w stanie zwarcia uzwojenia kolumny zewnętrznej, wynika ze zjawiska przeciwdziałania strumieni. Zjawisko to wyjaśnia rysunek 5.11. Zgodnie z regułą Lenza prąd I_S , w zwartym uzwojeniu kolumny zewnętrznej ma taki zwrot, że strumień Φ_S wytworzony przez ten prąd ma zwrot przeciwny do zwrotu strumienia Φ_7 wytworzonego przez prąd pierwotny transformatora.



Rys. 5.11. Zjawisko przeciwdziałania strumieni w kolumnie zewnętrznej.

Mimo znacznych odkształceń od sinusoidy przebiegów strumieni zamykających się w kolumnach zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego oraz w jego jarzmach, które występują przy zwartym uzwojeniu kolumny zewnętrznej, nie obserwuje się istotnych zmian w kształcie napięć fazowych strony wtórnej transformatora. Napięcia te zachowują kształt zbliżony do sinusoidalnego, co dla jednej z faz przedstawiono na rysunku 5.12. Stąd wynika ważny wniosek, że zwarcie uzwojenia kolumny zewnętrznej transformatora pięciokolumnowego nie wpływa negatywnie na przebieg procesu zapłonu

wyładowania głównego między elektrodami roboczymi oraz nie pogarsza stabilności pracy reaktora plazmowego.



Rys. 5.12. Oscylogramy napięć wzbudzanych w uzwojeniu z_7 kolumny zewnętrznej modelu transformatora, uzwojeniu z_6 nawiniętym na jarzmie oraz uzwojeniu z_3 nawiniętym na kolumnie fazowej transformatora przy zwartym uzwojeniu z_3 kolumny zewnętrznej.

Badania eksperymentalne modelu transformatora pozwoliły wstępnie potwierdzić słuszność idei zastosowania transformatorów pięciokolumnowych z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi do zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. W szczególności posłużyły do sprawdzenia celowości wykorzystania napięć indukowanych w uzwojeniach kolumn zewnętrznych transformatora do wstępnej jonizacji przestrzeni międzyelektrodowych, a w konsekwencji do ich przebiccia i zapoczątkowania wyładowania elektrycznego. Uzyskane na drodze pomiarowej wyniki pozwoliły stwierdzić prawidłowość postawionej tezy oraz stanowią podstawę opracowania zasad projektowania transformatorów z rdzeniem pięciokolumnowym i uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi jako układów zasilania łukowych reaktorów plazmowych. Na tej podstawie zbudowano i uruchomiono zasilacz laboratoryjny do zasilania trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową. Zasilacz ten wykazuje się prawidłową współpracą z reaktorem co potwierdza postawioną na wstępie tezę.

5.3. Projekt zasilacza laboratoryjnego

5.3.1. Założenia do projektowania

Reaktory plazmowe ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, mimo wielu doniesień z literatury o zastosowaniach na skalę laboratoryjną i pół-techniczną, oraz badań

zespołu Laboratorium Technologii Plazmowych, Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej, nie zostały dotychczas uszeregowane pod względem stosowanych mocy jednostkowych, prądów i napięć; brak jest też ich danych katalogowych. Dotychczasowe doświadczenia pozwalają natomiast określić zakres wartości w jakich powinny mieścić się parametry zasilacza i reaktora plazmowego, wartości te zestawiono w tablicy 14.

Uwzględniając podane w tablicy 14 parametry oraz wykorzystując dane pomiarowe uzyskane z badań laboratoryjnych modelu transformatora przedstawionego w rozdziale 5.2 zaprojektowano i zbudowano transformator pięciokolumnowy z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi przeznaczony do zasilania laboratoryjnych reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

Tablica 14. Parametry zasilacza i reaktora przyjęte do projektowania

Napięcie robocze elektrod	dla argonu	0,5 kV
	dla azotu	1,7 kV
	dla powietrza	1,5 kV
Prąd elektrod roboczych	dla argonu	2,2 A
	dla azotu	2 A
	dla powietrza	1,7 A
Częstotliwość napięcia elektrod roboczych		50 Hz
Napięcie zapłonu		5–20 kV
Częstotliwość napięcia zapłonowego		50 Hz – 20 kHz
Prąd elektrody zapłonowej		20–400 mA
Liczba elektrod jednego stopnia		3 lub 6
Liczba stopni		1 lub 2
Odstęp między elektrodami w miejscu zapłonu		2–10 mm
Układ połączeń transformatora		Yy

5.3.2. Budowa rdzenia i uzwojeń zasilacza

Obwód magnetyczny zasilacza laboratoryjnego zbudowano z rdzeni zwijanych prostokątnych z blach anizotropowych ET 150-30 zgodnych z normą EN 10107:2005. Charakterystykę magnesowania blachy, jej stratność, i przenikalność magnetyczną względną maksymalną przedstawiono w tablicach 15–18.

Tablica 15. Charakterystyka magnesowania $B_m=f(H_m)$ [86]

B_m	T	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
H_m	A/m	9,18	11,81	13,82	15,59	16,92	18,21	19,50	20,94	22,26
B_m	T	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
H_m	A/m	23,81	26,76	31,85	40,26	55,59	90,47	205,1	697,3	2670

Tablica 16. Stratność przy 50 Hz [86]

B_m	T	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
P_s	W/kg	0,025	0,052	0,085	0,125	0,170	0,220	0,277	0,341	0,409
B_m	T	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
P_s	W/kg	0,487	0,573	0,667	0,778	0,909	1,086	1,370	1,083	2,230

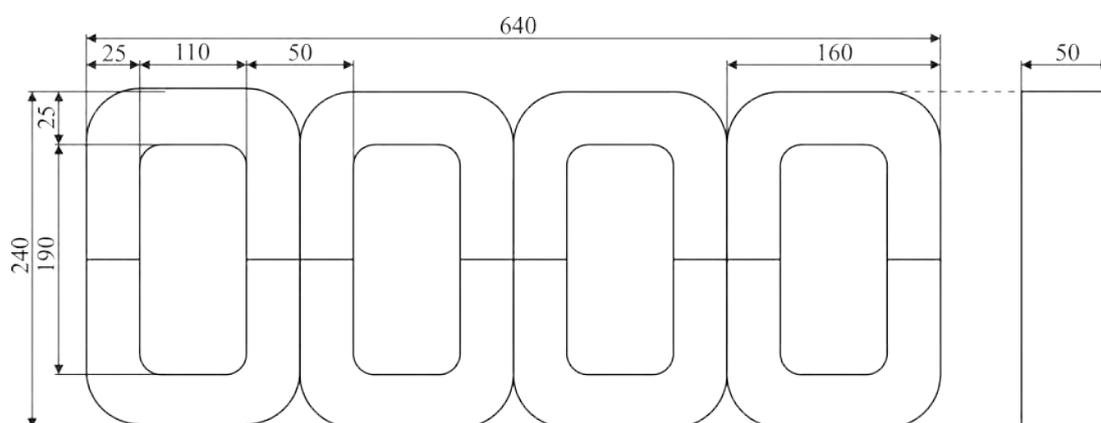
Tablica 17. Stratność pozorną przy 50 Hz [86]

B_m	T	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
S_s	VA/kg	0,03	0,07	0,11	0,15	0,20	0,26	0,32	0,39	0,46
B_m	T	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
S_s	VA/kg	0,55	0,65	0,79	0,97	1,27	1,87	3,72	12,2	49,8

Tablica 18. Przenikalność względna maksymalna przy 50 Hz [86]

B_m	T	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
μ_r	Gs/Oe	17363	20242	23044	25509	28223	30553	32651	34210	35729
B_m	T	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
μ_r	Gs/Oe	36772	35690	32470	27676	21465	14073	6593	2055	567

Geometrię obwodu magnetycznego zasilacza przedstawia rysunek 5.13, zaś inne dane techniczne zestawiono w tablicy 19. W celu umożliwienia założenia karkasów z uzwojeniami rdzenie, zwijane przecięto w połowie wysokości ich kolumn. Po zamontowaniu uzwojeń każdy z rdzeni został ściśnięty osobną opaską zaciskową.



Rys. 5.13. Geometria obwodu magnetycznego zasilacza laboratoryjnego.

Tablica 19. Dane rdzenia transformatora.

Przekrój kolumn fazowych, A_K	m^2	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Przekrój kolumn zewnętrznych transformatora, A_S	m^2	$1,25 \cdot 10^{-3}$
Przekrój jarzm, A_J	m^2	$1,25 \cdot 10^{-3}$
Wysokość kolumny, L_K	mm	190
Szerokość okna, T	mm	110
Grubość blachy transformatorowej	mm	0,30

Uzwojenia pierwotne zasilacza wykonano o liczbie zwojów 544, profilem miedzianym 2x3 mm, zaś uzwojenia wtórne drutem miedzianym $\varnothing 1,0$ mm, o liczbie zwojów 3600. Liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego dobrano tak, by transformator pracował na prostoliniowej części charakterystyki magnesowania. Uzwojenia pierwotne i wtórne nawinięto jako współśrodkowe, zaś uzwojenia kolumn zewnętrznych, w celu zwiększenia ich wytrzymałości elektrycznej, nawinięto schodkowo. Uzwojenia kolumn zewnętrznych wykonano drutem $\varnothing 0,4$ mm, w liczbie 25000 zwojów. Z podanych liczb zwojów poszczególnych uzwojeń wynikają następujące przekładnie zwojowe:

- między pierwotnym a wtórnym uzwojeniem fazowym

$$g_z = \frac{z_2}{z_1} = \frac{3600}{544} = 6,6, \quad (5.22)$$

- między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej

$$\delta_{sz} = \frac{z_s}{z_1} = \frac{25000}{544} = 46. \quad (5.23)$$

Dane techniczne dotyczące konstrukcji uzwojeń zebrano w tablicy 20.

Tablica 20. Dane dotyczące uzwojeń zasilacza.

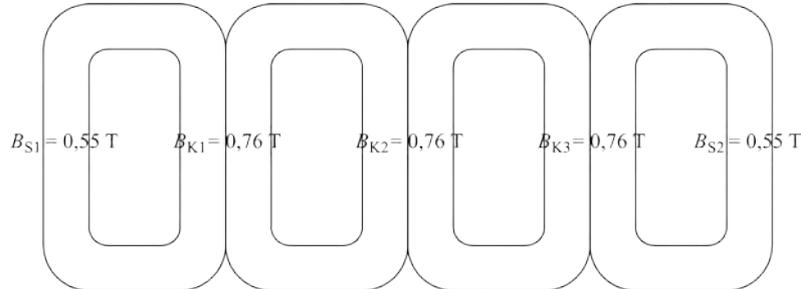
Liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, z_1	–	544
Liczba zwojów uzwojenia wtórnego fazowego, z_2	–	3600
Liczba zwojów uzwojenia wtórnego kolumny zewnętrznej, z_s	–	25000
Przekrój drutu uzwojenia pierwotnego	mm^2	6
Przekrój drutu uzwojenia wtórnego	mm^2	0,78
Przekrój drutu uzwojenia wtórnego kolumny zewnętrznej	mm^2	0,12

Rozkład indukcji w rdzeniu transformatora przedstawiono na rysunku 5.14. Wynosi ona:

$$B_K = \frac{E_1}{4,44 \cdot z_1 \cdot f \cdot A_K} = \frac{230}{4,44 \cdot 544 \cdot 50 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 0,76 \text{ T}, \quad (5.24)$$

$$B_s = \frac{E_s}{4,44 \cdot z_s \cdot f \cdot A_s} = \frac{3800}{4,44 \cdot 25000 \cdot 50 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}} = 0,55 \text{ T}, \quad (5.25)$$

odpowiednio dla kolumn fazowych oraz kolumn zewnętrznych transformatora.



Rys. 5.14. Rozkład indukcji w rdzeniu transformatora.

Gęstość prądu dla transformatorów małej mocy przyjmuje się z zakresu 2,2-3,0 A/mm² [87] w zależności od budowy uzwojeń, warunków chłodzenia a także wartości strat obciążeniowych i wytrzymałości przewodów na rozrywanie podczas zwarcia. Zakładając, że zasilacz laboratoryjnego reaktora plazmowego nie jest przeznaczony do pracy ciągłej przyjęto gęstość prądu równą 3 A/mm². Przy takiej gęstości prądu i przyjętych w projekcie przekrojach drutu uzwojeń fazowych strony pierwotnej i wtórnej, maksymalne wartości prądu tych uzwojeń wynoszą odpowiednio: 19 A i 2,4 A. Ze względu na niską wartość prądu strony wtórnej oraz przekładnię transformatora wynoszącą 6,6 ograniczono prąd strony pierwotnej do wartości 16 A.

Przekładnia prądowa \mathcal{G}_{Si} i napięciowa \mathcal{G}_{Su} między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem kolumny zewnętrznej transformatora wyliczone na podstawie zależności 5.5 i 5.14 wynoszą odpowiednio:

$$\mathcal{G}_{Si} = \mathcal{G}_{Sz} = \frac{z_s}{z_1} = \frac{25000}{544} = 46, \quad (5.26)$$

$$\mathcal{G}_{Su} = \mathcal{G}_{Sz} \frac{A_s B_s}{A_K B_K} = \frac{25000}{544} \cdot \frac{1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,55}{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,76} = 16,6. \quad (5.27)$$

Dane znamionowe zasilacza zebrano w tabelicy 21 natomiast dane dotyczące przekładni zestawiono w tabelicy 22.

Tablica 21. Dane znamionowe zasilacza.

Napięcie pierwotne fazowe, U_1	V	230
Napięcie wtórne fazowe, U_2	kV	1,5
Napięcie wtórne uzwojeń kolumn zewnętrznych, U_s	kV	3,8
Prąd pierwotny, I_1	A	16
Prąd wtórny, I_2	A	2,4
Prąd wtórny uzwojenia kolumny zewnętrznej, I_s	mA	350
Moc transformatora, S	kVA	11

Tablica 22. Przekładnie transformatora

Przekładnie między uzwojeniem pierwotnym i wtórnym			Przekładnie między uzwojeniem pierwotnym i uzwojeniem kolumny zewnętrznej		
Zwojowa	Napięciowa	Prądowa	Zwojowa	Napięciowa	Prądowa
$\mathcal{G}_z = \frac{z_2}{z_1}$	$\mathcal{G}_u = \frac{U_2}{U_1}$	$\mathcal{G}_i = \frac{I_1}{I_2}$	$\mathcal{G}_{sz} = \frac{z_s}{z_1}$	$\mathcal{G}_{su} = \frac{U_s}{U_1}$	$\mathcal{G}_{si} = \frac{I_1}{I_s}$
6,6	6,6	6,6	46	16,6	46

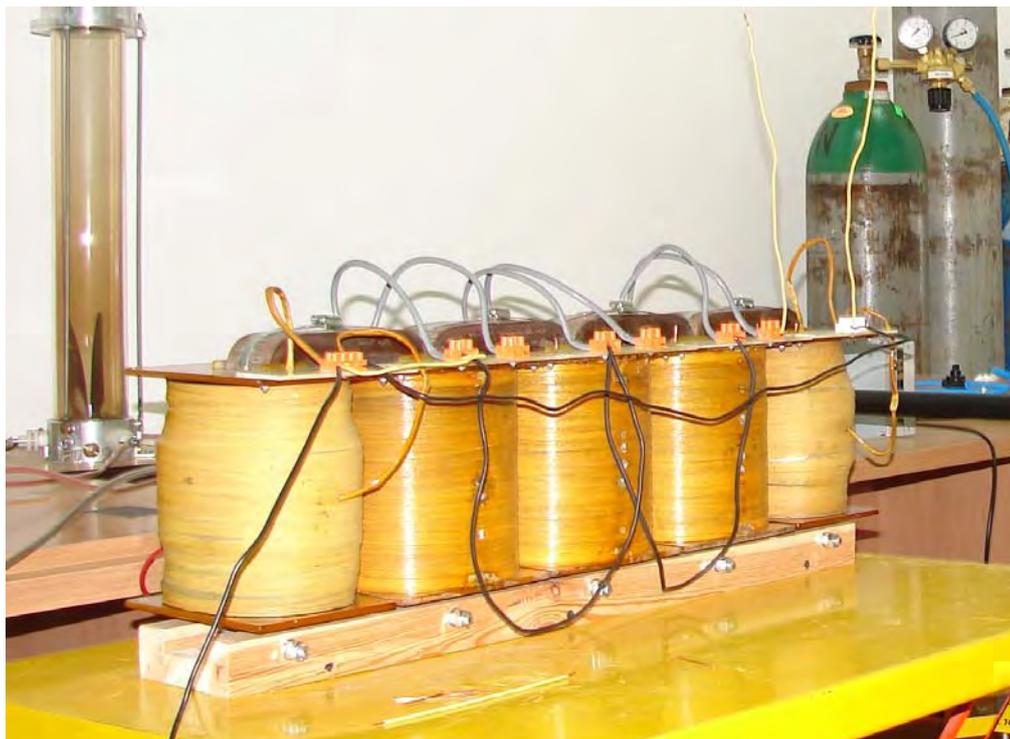
W tablicy 23 zestawiono pomiary rezystancji uzwojeń transformatora. Na ich podstawie można przyjąć, że po uśrednieniu rezystancja uzwojeń pierwotnych wynosi $0,93 \Omega$, rezystancja uzwojeń wtórnych $37,9 \Omega$, a rezystancja uzwojeń kolumn zewnętrznych wynosi $1,16 \text{ k}\Omega$.

Tablica 23. Rezystancja uzwojeń transformatora.

Uzwojenia pierwotne			Uzwojenia wtórne			Uzwojenia kolumn zewnętrznych	
R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{21}	R_{22}	R_{23}	R_{S1}	R_{S2}
Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	k Ω	k Ω
0,93	0,94	0,93	37,9	38,2	37,8	1,16	1,17

$t=22 \text{ }^\circ\text{C}$ ciśnienie=1020 hPa wilgotność wzgl.=51 %

Zdjęcie gotowego do pracy na stanowisku badawczym zasilacza laboratoryjnego do zasilania trójfazowych reaktorów plazmowych z elektrodą zapłonową przedstawiono na rysunku 5.15.



Rys. 5.15. Zasilacz laboratoryjny trójfazowych reaktorów plazmowych z elektrodą zapłonową.

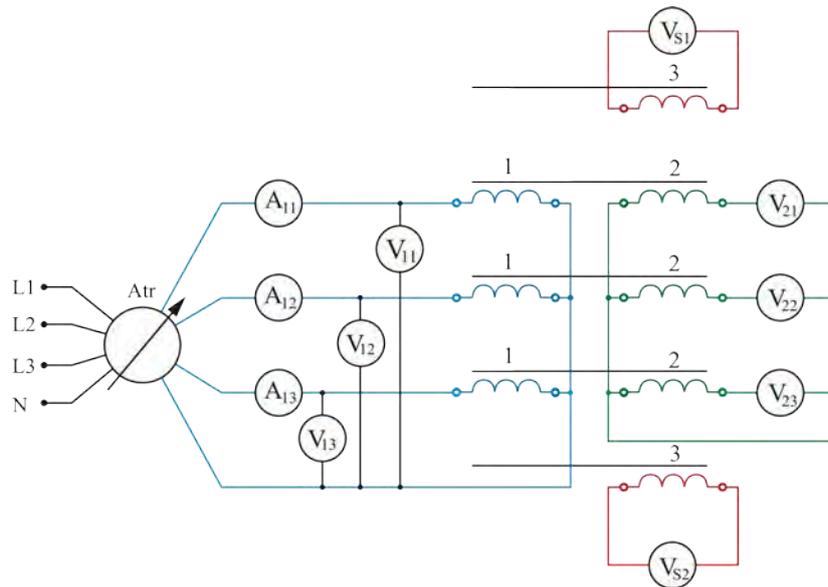
6. Badania eksperymentalne zasilacza

Zaprojektowany i zbudowany zasilacz laboratoryjny reaktorów plazmowych, bazujący na pięciokolumnowym transformatorze trójfazowym z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi, poddano badaniom w różnych stanach pracy, oraz przy obciążeniu trójfazowym reaktorem plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Zwrócono szczególną uwagę na wartości i przebiegi napięć indukowanych w uzwojeniach skrajnych kolumn zasilacza, analizując praktycznie możliwe przypadki pracy tych uzwojeń. Wykreślono charakterystyki prądowo-napięciowe uzwojeń zapłonowych, których kształt decyduje o skuteczności i możliwości ograniczenia wartości prądu w obwodzie zapłonowego. Przedyskutowano wpływ reaktancji rozproszenia uzwojeń zapłonowych i uzwojeń roboczych zasilacza na charakterystyki jego pracy.

6.1. Charakterystyki stanu jałowego zasilacza

Przy zasilaniu reaktorów plazmowych ważnym zagadnieniem jest uzyskanie pewnego zapłonu władowania. W przypadku zasilacza laboratoryjnego wykorzystującego transformator pięciokolumnowy z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi wiąże się to z koniecznością uzyskania właściwych wartości napięć indukowanych w uzwojeniach

kolumn zewnętrznych. Na rysunku 6.1 przedstawiono układ, w którym wykonano pomiary w stanie jałowym pracy zasilacza. Zmierzone wartości napięć i prądów zestawiono w tablicy 24 i 25.



Rys. 6.1. Pomiar napięć indukowanych w poszczególnych uzwojeniach transformatora.

Tablica 24. Wartości napięć indukowanych w uzwojeniach wtórnych transformatora.

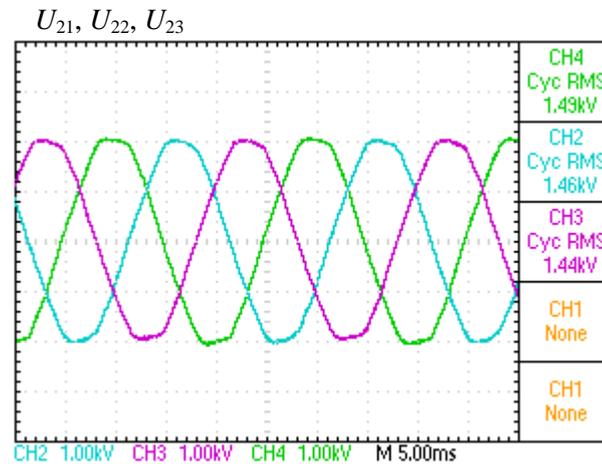
Napięcia strony pierwotnej			Napięcia w uzwojeniach kolumn fazowych			Napięcia w uzwojeniach kolumn zewnętrznych	
U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{21}	U_{22}	U_{23}	U_{S1}	U_{S2}
V	V	V	kV	kV	kV	kV	kV
230	230	230	1,49	1,46	1,44	3,76	3,95

Na podstawie danych z tablicy 24 można przyjąć, że uśredniona wartość napięcia indukowanego we wtórnych uzwojeniach fazowych zmierzona w stanie jałowym transformatora wynosi 1,46 kV, co daje o 40 V wartość mniejszą od założonej w projekcie, czyli błąd na poziomie 2,7 %. Uśredniona wartość skuteczna napięć indukowanych w uzwojeniach kolumn zewnętrznych wynosi około 3,64 kV i jest o 160 V (4,2 %) mniejsza od zakładanej w obliczeniach. Zmierzony prąd stanu jałowego I_0 transformatora (tablica 25) po uśrednieniu wynosi 0,1 A i stanowi około 0,7 % wartości prądu znamionowego.

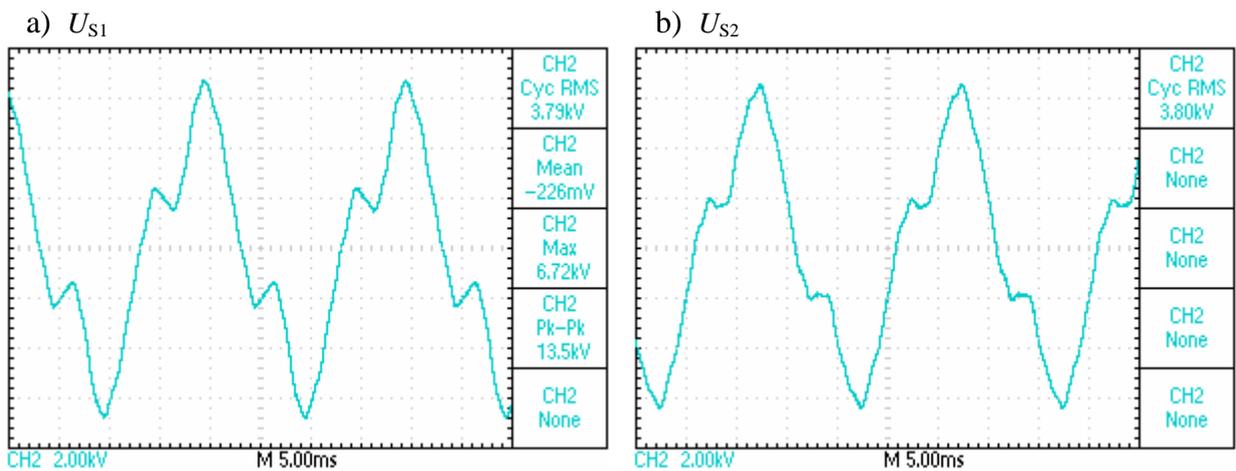
Tablica 25. Prądy strony pierwotnej transformatora w stanie jałowym.

U_{11}	U_{12}	U_{13}	I_{o11}	I_{o12}	I_{o13}
V	V	V	mA	mA	mA
230	230	230	100	90	110

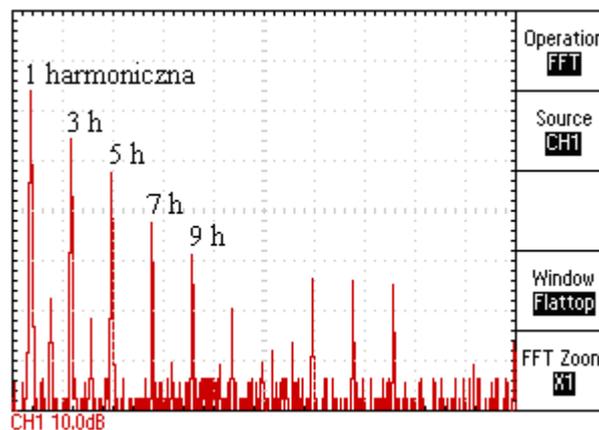
Na rysunku 6.2 przedstawiono przebiegi napięć indukowanych we wtórnych uzwojeniach fazowych transformatora, natomiast na rysunku 6.3 przebiegi napięć indukowanych odpowiednio w uzwojeniu lewej i prawej kolumny zewnętrznej.



Rys. 6.2. Przebiegi napięć fazowych strony wtórnej transformatora.



6.3. Przebiegi napięcia zmierzonego na uzwojeniach kolumn zewnętrznych transformatora w stanie jałowym: a – na uzwojeniu lewej kolumny, b – na uzwojeniu prawej kolumny.



Rys. 6.4. Zawartość wyższych harmoniczných w napięciu indukowanym w lewej zewnętrznej kolumnie transformatora w stanie jałowym.

Mimo sinusoidalnych przebiegów napięć fazowych, napięcia indukowane w uzwojeniach kolumn zewnętrznych są odkształcone od sinusoidy, a analiza FFT (rysunek 6.4) wskazuje na wysoką zawartość wyższych harmoniczných, w szczególności 3, 5, 7 i 9. Z uzyskanych pomiarów wynika, że w rdzeniu transformatora pięciokolumnowego zbudowanego z rdzeni zwijanych ciętych panuje nierównomierny rozkład indukcji, a jej wartości w poszczególnych kolumnach fazowych wynoszą:

$$B_{K1} = \frac{U_{21}}{4,44 \cdot z_{21} \cdot f \cdot A_K} = \frac{1490}{4,44 \cdot 3600 \cdot 50 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 0,74 \text{ T}, \quad (6.1)$$

$$B_{K2} = \frac{U_{22}}{4,44 \cdot z_{22} \cdot f \cdot A_K} = \frac{1460}{4,44 \cdot 3600 \cdot 50 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 0,73 \text{ T}, \quad (6.2)$$

$$B_{K3} = \frac{U_{23}}{4,44 \cdot z_{23} \cdot f \cdot A_K} = \frac{1440}{4,44 \cdot 3600 \cdot 50 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 0,72 \text{ T}, \quad (6.3)$$

Natomiast indukcja w kolumnach zewnętrznych wynosi odpowiednio dla lewej i prawej kolumny:

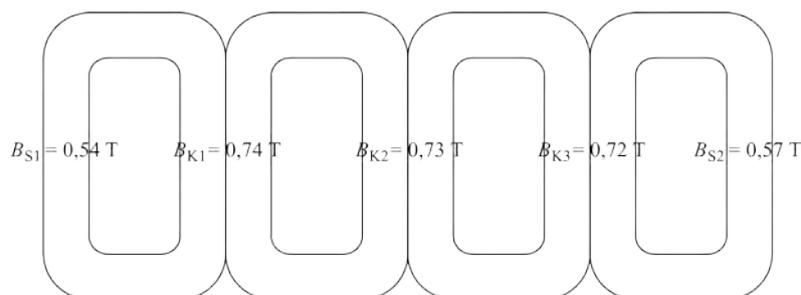
$$B_{S1} = \frac{U_{S1}}{4,44 \cdot z_{S1} \cdot f \cdot A_S} = \frac{3760}{4,44 \cdot 25000 \cdot 50 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}} = 0,54 \text{ T}, \quad (6.4)$$

$$B_{S2} = \frac{U_{S2}}{4,44 \cdot z_{S2} \cdot f \cdot A_S} = \frac{3950}{4,44 \cdot 25000 \cdot 50 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}} = 0,57 \text{ T}. \quad (6.5)$$

Dane dotyczące indukcji w rdzeniu transformatora zebrano w tabelicy 26 oraz przedstawiono na rysunku 6.5.

Tablica 26. Wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu pięciokolumnowym.

Kolumny fazowe			Kolumny zewnętrzne	
B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{S1}	B_{S2}
T	T	T	T	T
0,74	0,73	0,72	0,50	0,55



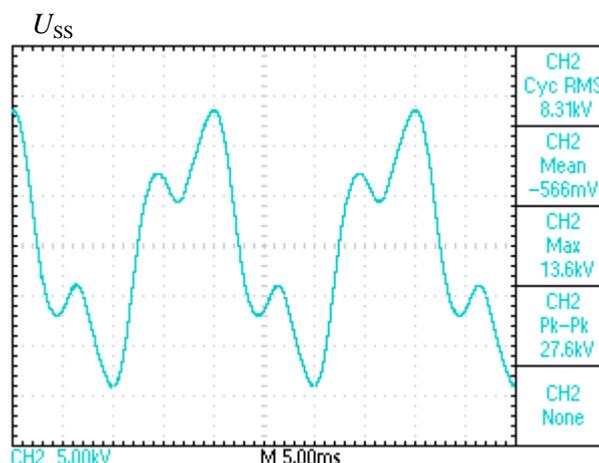
Rys. 6.5. Rozkład indukcji w rdzeniu transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi.

Przedstawione w tabelicy 26 rozbieżności między wartościami indukcji w poszczególnych kolumnach fazowych oraz różnice w indukcji między lewą a prawą kolumną zewnętrzną są wynikiem asymetrii obwodu magnetycznego transformatora. Jej powodem są różnice w parametrach poszczególnych rdzeni zwijanych ciętych użytych do konstrukcji obwodu magnetycznego oraz szczeliny powietrzne wstępujące w kolumnach i jarzmach transformatora wykonanego z rdzeni zwijanych. Szczeliny te stanowią dla strumieni magnetycznych drogę o dużej reluktancji, która utrudnia przepływ strumieni między sąsiadującymi ze sobą rdzeniami zwijanymi a tym samym ich wyrównywanie się w poszczególnych odcinkach obwodu magnetycznego.

Łącząc szeregowo uzwojenia kolumn zewnętrznych zasilacza można zwiększyć wartość napięcia zasilającego układ zapłonowy reaktora plazmowego zgodnie z zależnością:

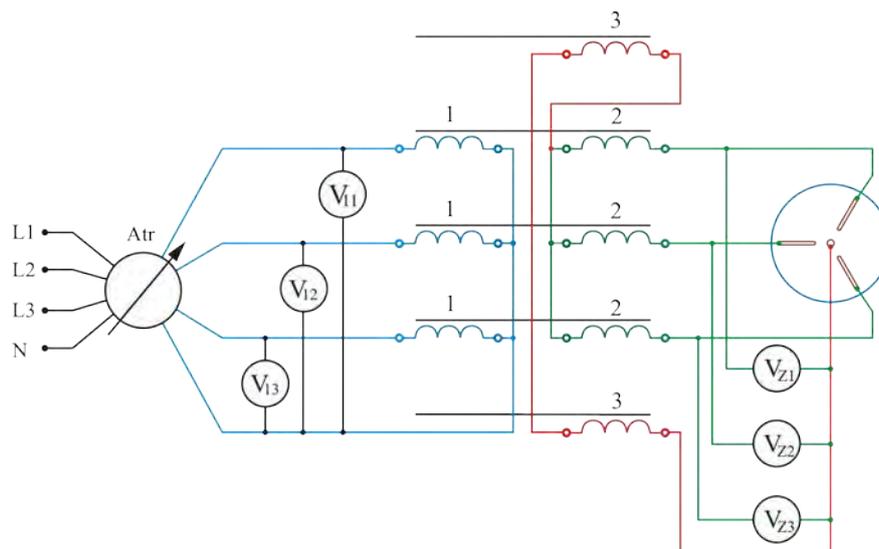
$$\underline{U}_{SS} = \underline{U}_{S1} + \underline{U}_{S2} \quad (6.6)$$

Na rysunku 6.6 przedstawiono przebieg napięcia na zaciskach szeregowo połączonych uzwojeń kolumn zewnętrznych.



Rys. 6.6. Przebieg napięcia zmierzony na zaciskach szeregowo ze sobą połączonych uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora.

Przy zasilaniu trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową, napięcie zapłonu wyładowania występuje między elektrodą zapłonową a poszczególnymi elektrodami roboczymi. Obwód zapłonowy składa się wówczas z szeregowo ze sobą połączonych uzwojeń kolumn zewnętrznych oraz uzwojeń fazowych strony wtórnej transformatora. Układ do pomiaru napięcia zapłonowego w reaktorze plazmowym przedstawiono na rysunku 6.7.



Rys. 6.7. Układ do pomiaru napięć zapłonowych.

W układzie jak na rysunku 6.7 napięcia zapłonowe dla poszczególnych przerw międzyelektrodowych opisane są z zależnościami:

$$\underline{U}_{z1} = \underline{U}_{ss} + \underline{U}_{21}, \quad (6.7)$$

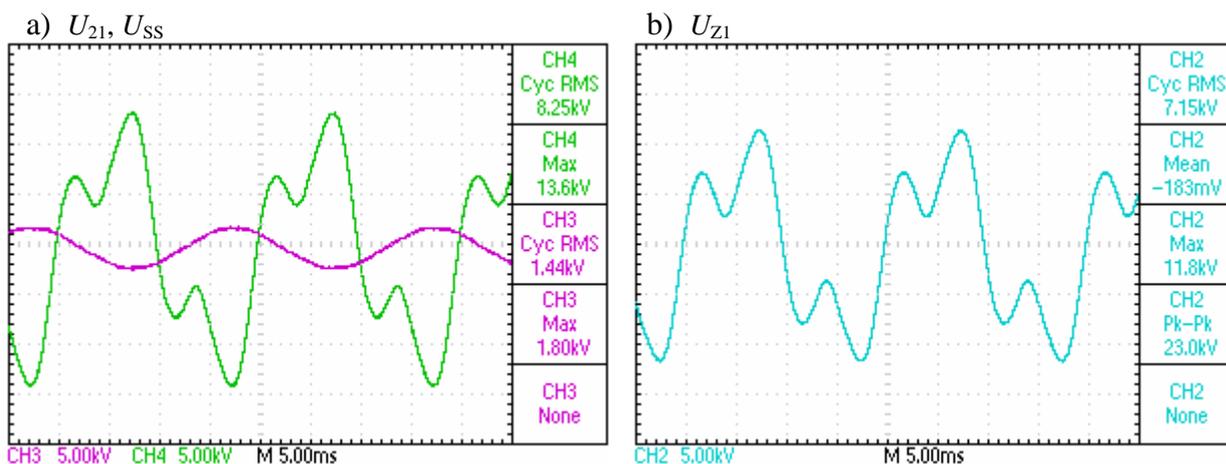
$$\underline{U}_{z2} = \underline{U}_{ss} + \underline{U}_{22}, \quad (6.8)$$

$$\underline{U}_{z3} = \underline{U}_{ss} + \underline{U}_{23}. \quad (6.9)$$

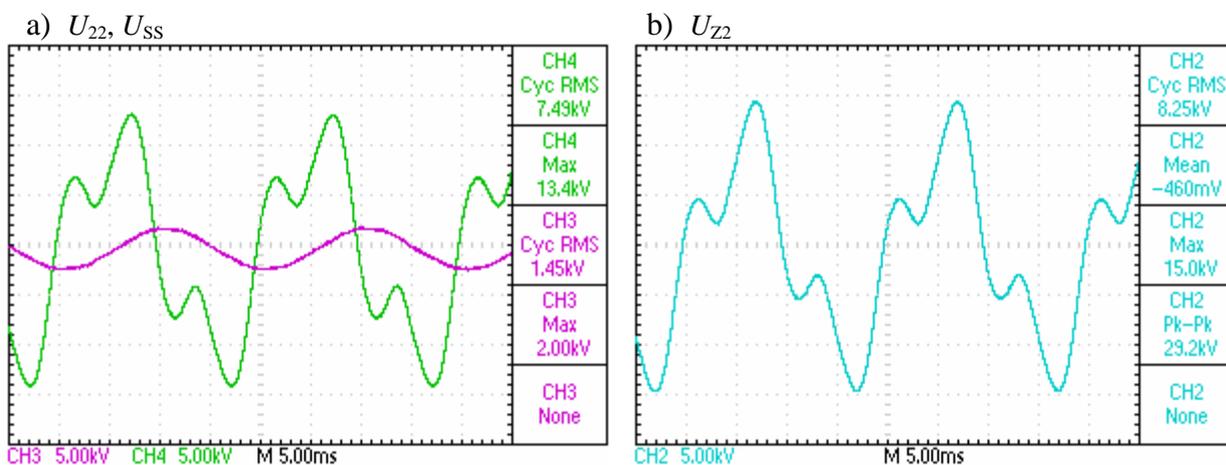
Przesunięcia fazowe występujące między sumą napięć indukowanych w uzwojeniach kolumn zewnętrznych transformatora oraz napięciami indukowanymi w uzwojeniach wtórnych poszczególnych jego faz (rys. 6.8a, 6.9a i 6.10a), powodują, że różnice w wartościach napięć na poszczególnych przerwach międzyelektrodowych są znaczne. Na rysunkach 6.8b, 6.9b i 6.10b przedstawiono przebiegi napięć międzyelektrodowych występujących w stanie jałowym pomiędzy elektrodą zapłonową reaktora plazmowego a jego elektrodami roboczymi. Oscylogramy te zdjęto dla zgodnego połączenia uzwojeń fazowych transformatora z uzwojeniami kolumn zewnętrznych w układzie przedstawionym na rysunku 6.7. Dla porównania wartości skuteczne i maksymalne tych napięć zestawiono w tabelicy 27.

Tabela 27. Wartości napięć skutecznych i maksymalnych mierzonych pomiędzy elektrodą zapłonową reaktora plazmowego a elektrodą roboczą każdej z faz w stanie jałowym.

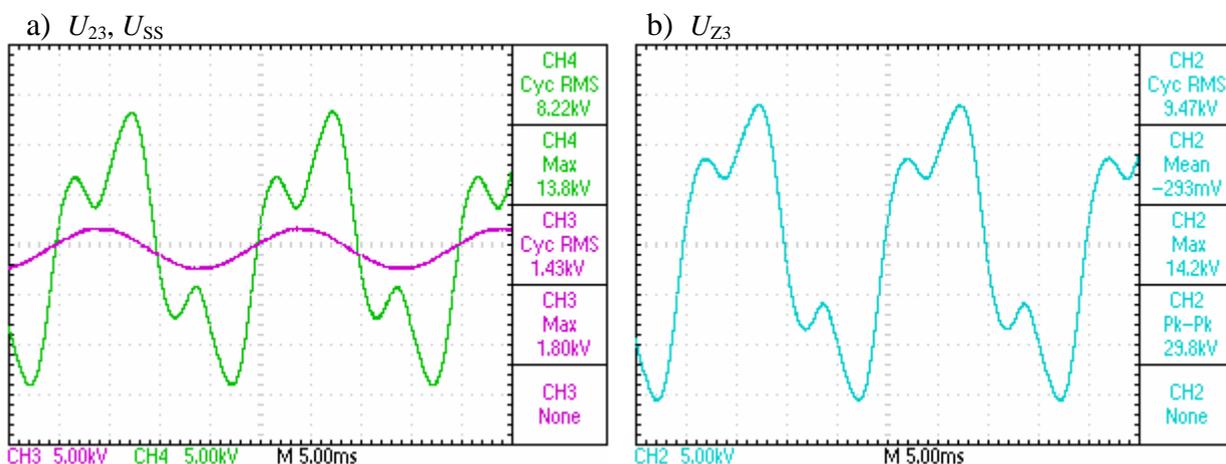
Sposób skojarzenia uzwojeń	U_{z1}	U_{mz1}	U_{z2}	U_{mz2}	U_{z3}	U_{mz3}
	kV	kV	kV	kV	kV	kV
Zgodne	7,15	11,8	8,25	15,0	9,47	14,2
Przeciwnie	8,82	15,2	7,90	12,8	6,36	11,6



Rys. 6.8. Napięcie na uzwojeniach wtórnych transformatora: a – napięcie na uzwojeniu fazy L1 (CH3) i szeregowo połączonych uzwojeniach kolumn zewnętrznych (CH4), b – napięcie zapłonu między elektrodą zapłonową a elektrodą roboczą fazy L1.



Rys. 6.9. Napięcie na uzwojeniach wtórnych transformatora: a – napięcie na uzwojeniu fazy L2 (CH3) i szeregowo połączonych uzwojeniach kolumn zewnętrznych (CH4), b – napięcie zapłonu między elektrodą zapłonową a elektrodą roboczą fazy L2.



Rys. 6.10. Napięcie na uzwojeniach wtórnych transformatora: a – napięcie na uzwojeniu fazy L3 (CH3) i szeregowo połączonych uzwojeniach kolumn zewnętrznych (CH4), b – napięcie zapłonu między elektrodą zapłonową a elektrodą roboczą fazy L3.

Nierówność napięć występujących między elektrodą zapłonową a elektrodami roboczymi poszczególnych faz reaktora plazmowego, w przypadku niewielkich przerw międzyelektrodowych, nie wpływa w sposób istotny na występowanie zapłonów. Utrudniony zapłon może być obserwowany dopiero przy dużych przerwach międzyelektrodowych. Wtedy, nierównomierny rozkład pola elektrycznego i towarzysząca mu nierównomierna jonizacja przestrzeni między elektrodą zapłonową a poszczególnymi elektrodami roboczymi, może, w skrajnym przypadku, powodować brak zapłonu wyładowania na jednej z elektrod roboczych. W przypadku konieczności stosowania dużych przerw międzyelektrodowych można tego uniknąć poprzez niesymetryczne umieszczenie elektrody zapłonowej względem poszczególnych elektrod roboczych, co przy nierównych napięciach zapłonowych poszczególnych przerw międzyelektrodowych przełoży się na jednakowe wykorzystanie elektrod roboczych w procesie zapłonu wyładowania. Zestawienia napięć zapłonowych występujących przy różnych połączeniach uzwojeń zewnętrznych transformatora i dla różnych konstrukcji układów zapłonowych reaktorów plazmowych dokonano w tabelicy 28.

Tablica 28. Wartości napięć zapłonowych dla różnych konfiguracji połączeń uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego.

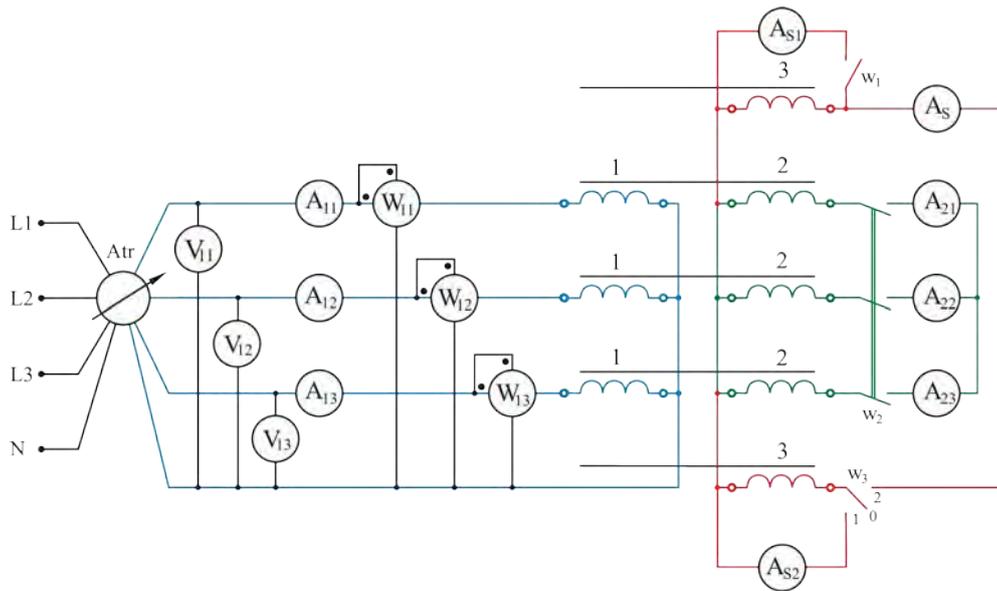
Przy pracy niezależnej		Szeregowego połączenia	Szeregowo połączonych uzwojeń kolumn zewnętrznych i uzwojeń wtórnych poszczególnych faz transformatora		
U_{S1}	U_{S2}	U_{S12}	U_{21S}	U_{22S}	U_{23S}
kV	kV	kV	kV	kV	kV
3,76	3,95	8,31	7,15	8,25	9,47

6.2. Próba zwarcia zasilacza

Zwarcie pomiarowe transformatora przeprowadzone zostało w układzie przedstawionym na rysunku 6.11. Pomiar, wykonany przy zwartych wtórnych uzwojeniach fazowych i rozwartych uzwojeniach kolumn zewnętrznych zasilacza, zebrano w tabelicy 29.

Tablica 29. Wyniki zwarcia pomiarowego transformatora.

U_{11}	U_{12}	U_{13}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	I_{21}	I_{22}	I_{23}
V	V	V	A	A	A	W	W	W	A	A	A
66	66	66	15,5	15,3	15,5	420	430	430	2,4	2,4	2,5



Rys. 6.11. Schemat do próby zwarcia zasilacza.

Z uzyskanych pomiarów wynika że procentowe napięcie zwarcia transformatora wynosi:

$$u_z = \frac{U_{1z}}{U_{1n}} \cdot 100 = \frac{66}{230} \cdot 100 = 28,7\% . \quad (6.10)$$

Zakładając, że cała moc, którą pobiera transformator przy zwarciu jest zużywana na pokrycie tylko strat wywołanych przepływem prądu przez jego uzwojenia, można przyjąć straty obciążeniowe równe:

$$\Delta P_{\text{obc}} = P_{11} + P_{12} + P_{13} = 420 + 430 + 420 = 1270 \text{ W} . \quad (6.11)$$

Wyliczona na podstawie pomiaru zwarcia impedancja zwarcia i jej składowe tj. rezystancja zwarcia i reaktancja zwarcia wynoszą odpowiednio:

$$Z_z = \frac{U_{1z}}{I_{1n}} = \frac{66}{15,5} = 4,2 \Omega , \quad (6.12)$$

$$R_z = \frac{\Delta P_{\text{obc}}}{m \cdot I_{1n}^2} = \frac{1270}{3 \cdot 15,5^2} = 1,7 \Omega , \text{ gdzie } m \text{ jest liczbą faz,} \quad (6.13)$$

$$X_z = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2} = \sqrt{4,2^2 - 1,7^2} = 3,8 \Omega . \quad (6.14)$$

Wykorzystanie uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego do zasilania układu zapłonowego reaktora plazmowego, wymaga analizy pracy tych uzwojeń w stanie zwarcia. Charakterystyka prądowo-napięciowa obwodu zapłonowego powinna być podatna, ponieważ obciążeniem obwodu są łuki krótkie (iskry zapłonowe). Od układu zasilania wymaga się by ograniczał prąd w obwodzie zapłonowym do poziomu, uniemożliwiającego osiągnięcie mocy prowadzących do powstania wyładowania

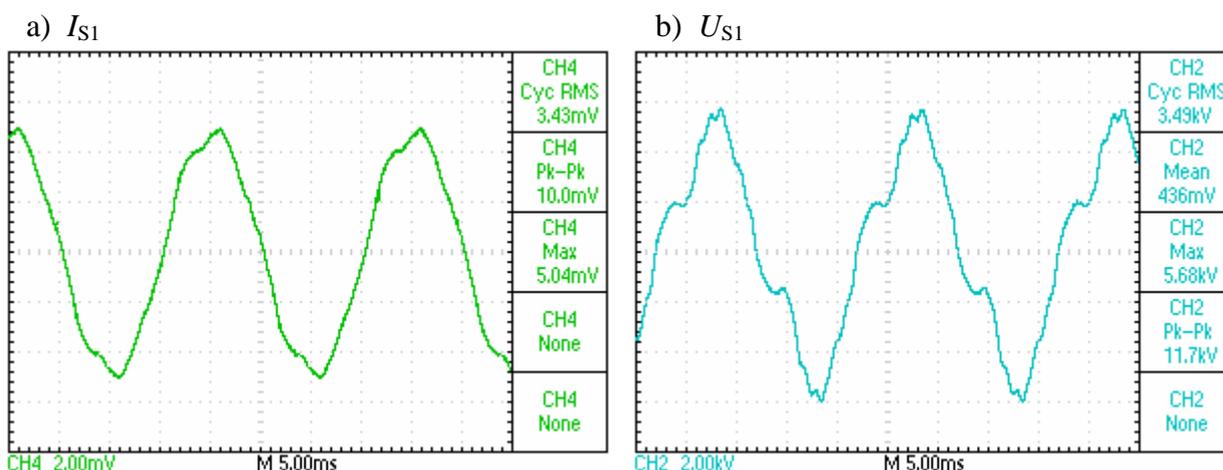
lukowego, które mogłyby uszkodzić układ zapłonowy reaktora plazmowego oraz sam zasilacz. W tabelicy 30 zebrano pomiary stanu zwarcia uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora, dla różnych konfiguracji ich połączeń, przy uzwojeniach fazowych zasilacza będących w stanie jałowym. Pomiary wykonano w układzie jak na rysunku 6.11 przy rozwartym wyłączniku w_2 i wyłącznikach:

- w_1 otwarty, w_3 w pozycji 2 dla szeregowego połączenia uzwojeń,
- w_1 zamknięty, w_3 w pozycji 2 dla równoległego połączenia uzwojeń,
- w_1 zamknięty, w_3 w pozycji 1 dla pracy niezależnej uzwojeń,
- w_1 zamknięty, w_3 w pozycji 0 przy zwarcie tylko jednego z uzwojeń.

Tablica 30. Wyniki zwarcia uzwojeń kolumn zewnętrznych zasilacza.

Praca uzwojeń zewnętrznych	U_{11}	U_{12}	U_{13}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{S1}	I_{S2}
	V	V	V	mA	mA	mA	mA	mA
niezależna	230	230	230	170	100	230	3,4	4,7
szeregową	230	230	230	190	120	190	4	
równoległa	230	230	230	160	850	220	7,9	

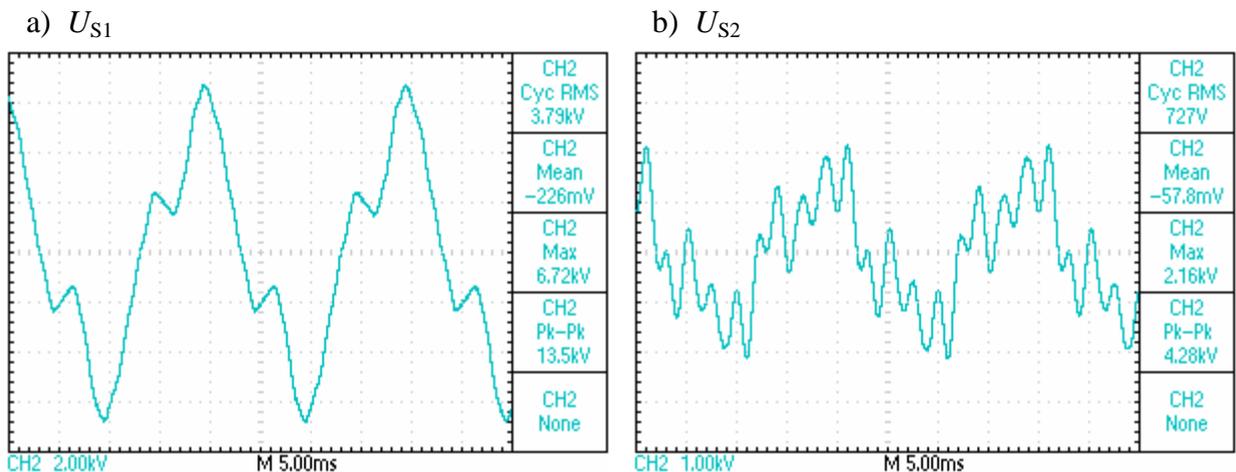
Z wykonanych pomiarów wynika, że charakterystyka obciążenia uzwojeń zewnętrznych zasilacza jest bardzo podatna (miękka). Prąd w zwartych uzwojeniach kolumn zewnętrznych ma przebieg zbliżony do sinusoidalnego (rys. 6.12a) o wyraźnie niższej zawartości wyższych harmonicznych niż w napięciu indukowanym w uzwojeniach zewnętrznych w stanie jałowym (rys. 6.12b).



Rys. 6.12. Przebieg prądu w zwartym uzwojeniu kolumny zewnętrznej transformatora (a) oraz napięcia indukowanego w tym uzwojeniu w stanie jałowym (b).

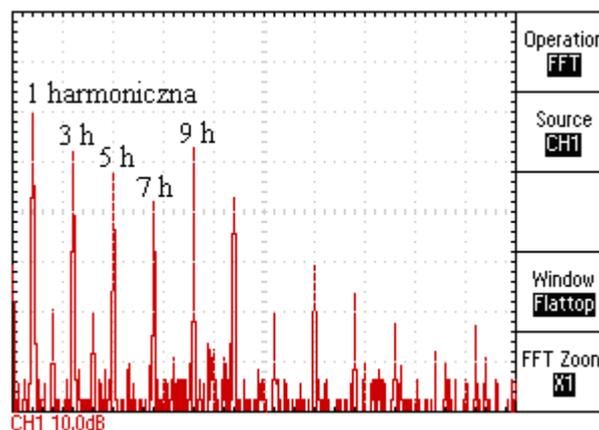
Dla przypadku, w którym zasilane są z transformatora dwa reaktory plazmowe z elektrodami zapłonowymi należy przeanalizować stan zwarcia tylko jednego z uzwojeń kolumn zewnętrznych. Stan taki odpowiada sytuacji gdy układ zapłonowy jednego z reaktorów plazmowych jest zwarty przez iskrę zapłonową, a układ zapłonowy drugiego reaktora jest w stanie bezprądowym.

Zwarcie jednej kolumny zewnętrznej zasilacza pociąga za sobą wzrost zawartości wyższych harmonicznnych w napięciu indukowanym w uzwojeniu drugiej kolumny zewnętrznej, będącej w stanie jałowym (rys. 6.13).



Rys. 6.13. Napięcia indukowane w uzwojeniu kolumny zewnętrznej zasilacza: a – w stanie jałowym jego pracy, b – w stanie zwarcia uzwojenia drugiej kolumny zewnętrznej.

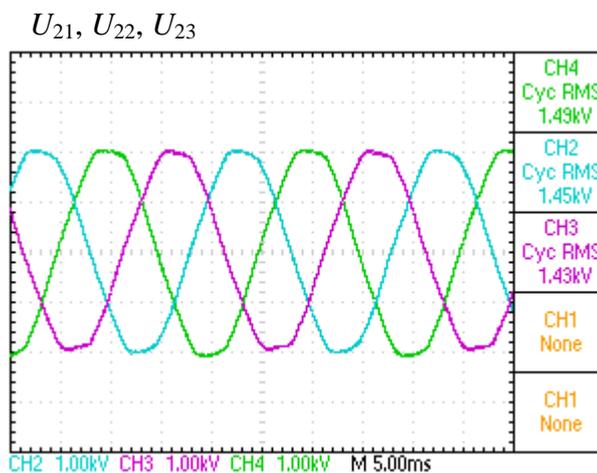
Napięcie z rysunku 6.13b charakteryzuje się silnym odkształceniem od przebiegu sinusoidalnego a analiza FFT tego napięcia (rys. 6.14) wykazuje wysoką zawartość harmonicznnych nieparzystych, spośród których najwyższy udział mają harmoniczna 3, 5, 7, 9 i 11.



Rys. 6.14. Spektrum wyższych harmonicznnych w napięciu uzwojenia kolumny zewnętrznej.

Duży stopień odkształcenia napięcia indukowanego w uzwojeniu zapłonowym zasilacza (rys. 6.13b) nie wpływa negatywnie na zapłon wyładowania w reaktorze plazmowym. Mimo, że wartość skuteczna odkształconego napięcia (ok. 730 V) jest poniżej wymaganej do zjonizowania przestrzeni międzyelektrodowej, to chwilowe wartości maksymalne tego napięcia osiągają ok. 2 kV, co jest wartością wystarczającą do przebicia niewielkich przerw międzyelektrodowych występujących w strefie zapłonu reaktora plazmowego.

Za korzystny należy uznać fakt, że zwarcia uzwojeń kolumn zewnętrznych zasilacza nie wpływają na wartości napięć zasilających elektrody robocze reaktora plazmowego. Przebieg tych napięć dla stanu zwarcia jednego z uzwojeń kolumn zewnętrznych przedstawia rysunek 6.15. Wartości napięć indukowanych w tych warunkach we wtórnych uzwojeniach fazowych transformatora zestawiono w tabelicy 31 zaś na rysunku 6.16 przedstawiono rozkład indukcji w rdzeniu.



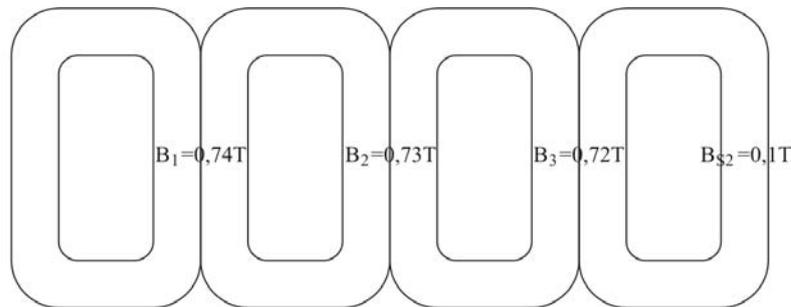
Rys. 6.15. Przebiegi napięć zasilających elektrody robocze reaktora plazmowego przy zwartym jednym uzwojeniu zapłonowym.

Tablica 31. Wartości napięć indukowanych w uzwojeniach zasilacza przy zwartym jednym uzwojeniu zapłonowym.

U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{21}	U_{22}	U_{23}	U_{S1}	U_{S2}
V	V	V	kV	kV	kV	V	V
230	230	230	1,49	1,45	1,43	zwarte	727

Indukcja w kolumnach fazowych transformatora przy zwartym uzwojeniu jednej kolumny zewnętrznej jest zgodna z obliczeniami 6.1, 6.2 i 6.3 natomiast indukcja w kolumnie zewnętrznej transformatora, której uzwojenie jest w stanie jałowym wynosi:

$$B_{S2} = \frac{U_{S2}}{4,44 \cdot z_{S2} \cdot f \cdot A_S} = \frac{727}{4,44 \cdot 25000 \cdot 50 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}} = 0,1 \text{ T} \quad (6.15)$$



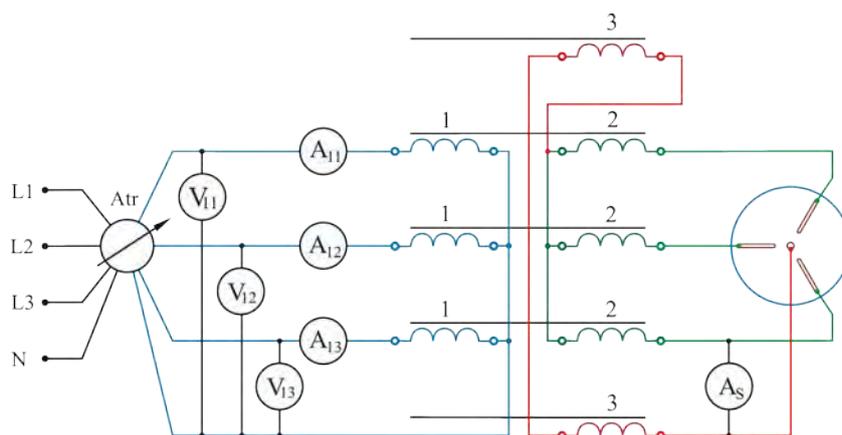
Rys. 6.16. Rozkład indukcji w rdzeniu transformatora przy zwartym uzwojeniu jednej z kolumn zewnętrznych.

Zwarcie uzwojenia jednej kolumny zewnętrznej transformatora powoduje nierównomierny przepływ prądów w poszczególnych fazach strony pierwotnej zasilacza. Największą wartość prądu równą 0,32 A odnotowuje się dla fazy, której uzwojenia bezpośrednio sąsiaduje ze zwartym uzwojeniem kolumny zewnętrznej transformatora. Natomiast w fazie najbardziej oddalonej od zwartego uzwojenia kolumny zewnętrznej zmierzony prąd ma wartość 0,04 A, czyli mniejszą od prądu stanu jałowego zasilacza. Wartości prądów uzyskane z pomiarów zestawiono w tablicy 32.

Tablica 32. Wartości prądów strony pierwotnej przy zwarcie jednego uzwojenia kolumny zewnętrznej i pozostałych uzwojeniach w stanie jałowym.

U_{11}	U_{12}	U_{13}	I_{11}	I_{12}	I_{13}
V	V	V	A	A	A
230	230	230	0,32	0,2	0,04

Przy zasilaniu reaktorów plazmowych z elektrodą zapłonową, zapłon wyładowania następuje pomiędzy tą elektrodą a elektrodami roboczymi. Z chwilą wystąpienia zapłonu łuk krótki zwiera obwód składający się z szeregowo połączonych uzwojeń kolumn zewnętrznych i uzwojeń fazowych transformatora. Uzwojenia fazowe zasilacza są tak zaprojektowane, by ich charakterystyka zewnętrzna była wystarczająco sztywne i prąd elektrod roboczych, po przejściu przez nie wyładowania, utrzymywał wartość wymaganą procesem plazmowym. Układ pomiarowy odpowiadający takiej sytuacji przedstawia rysunek 6.17, zaś w tablicy 33 zestawiono wyniki pomiarów.



Rys. 6.17. Układ do pomiaru zwarcia między elektrodą zapłonową a elektrodą roboczą.

Tablica 33. Wyniki zwarcia szeregowo połączonych uzwojeń zewnętrznych i uzwojenia fazowego.

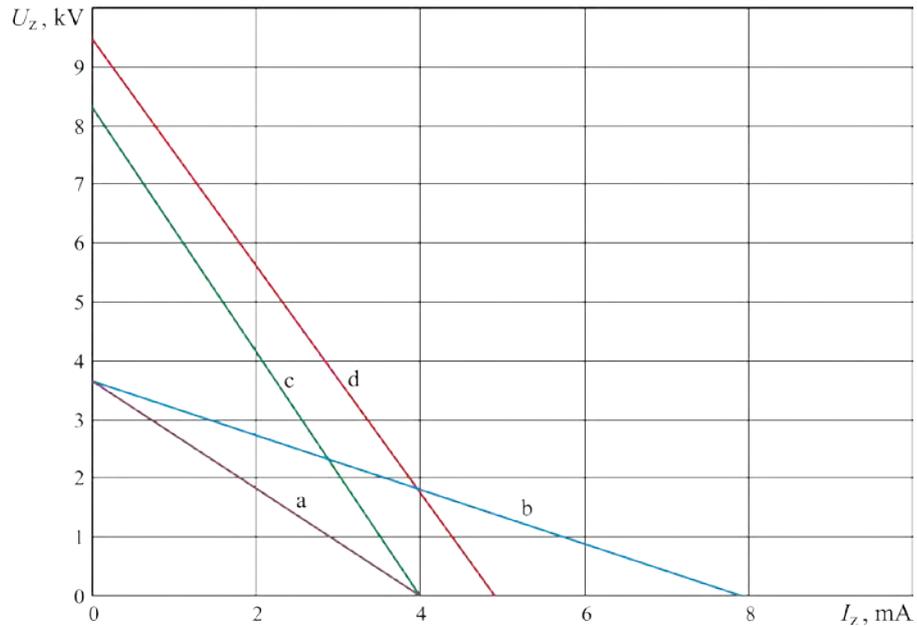
U_{11}	U_{12}	U_{13}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_s
V	V	V	mA	mA	mA	mA
230	230	230	210	140	250	4,9

Mimo włączenia w obwód zapłonowy uzwojeń fazowych, dostarczających moc do reaktora, charakterystyka zewnętrzna obwodu z rysunku 6.17 jest bardzo podatna. Przy zwarceniu obwodu prąd mierzony nie przekracza 5 mA. Zatem, po przebicciu przestrzeni między elektrodą zapłonową a dowolną z elektrod roboczych, nie jest możliwy taki przyrost prądu w obwodzie zapłonowym zasilacza, który spowodowałby przekształcenie się iskry zapłonowej w wyładowanie łukowe. Tym samym nie występuje ryzyko przeciążenia termicznego systemu zapłonowego ani przeciążenia prądowego uzwojeń kolumn skrajnych transformatora, liczonych do pracy przy prądach nie przekraczających 350 mA.

6.3. Charakterystyka zewnętrzna zasilacza

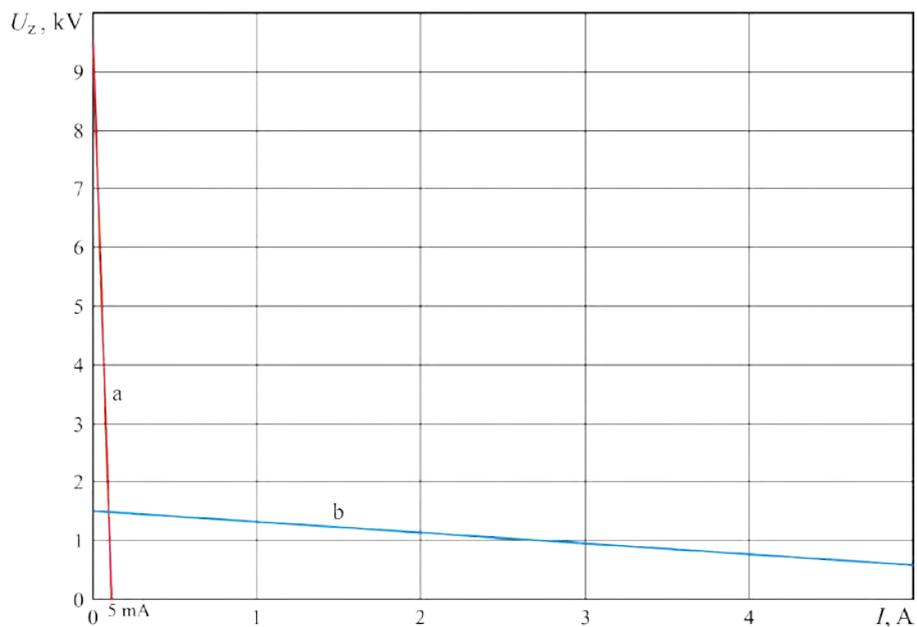
Na podstawie wykonanych pomiarów stanu jałowego i stanu zwarcia transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi wykreślono na rysunku 6.18 rodzinę charakterystyk zewnętrznych układu zapłonowego laboratoryjnego zasilacza reaktorów plazmowych z elektrodą zapłonową, dla różnych konfiguracji połączeń uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora:

- a – jednego uzwojenia kolumny zewnętrznej,
- b – równoległego połączenia uzwojeń kolumn zewnętrznych,
- c – szeregowego połączenia uzwojeń kolumn zewnętrznych,
- d – szeregowego połączenia uzwojeń kolumn zewnętrznych i uzwojenia fazowego.



Rys. 6.18. Charakterystyki zewnętrzne obwodu zapłonowego zasilacza dla różnych połączeń.

Niezależnie od sposobu połączenia uzwojeń zapłonowych, uzyskane charakterystyki są bardzo podatne (rys. 6.18). Napięcie stanu jałowego wynosi od 3,7 kV do 9,5 kV, w zależności od rodzaju gazu, a prąd zwarcia od 4 mA do 8 mA. Oznacza to, że z chwilą wystąpienia wyładowania na elektrodzie zapłonowej reaktora plazmowego, napięcie obniży się do napięcia elektrod roboczych (0,2-1,2 kV), by ponownie wzrosnąć do wartości stanu jałowego w kolejnym cyklu pracy reaktora.



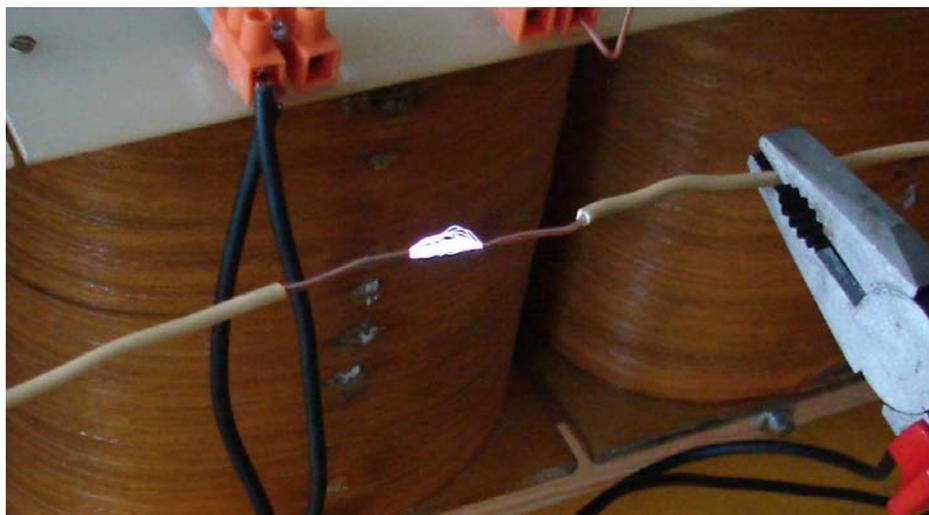
Rys. 6.19. Charakterystyka zewnętrzna układu zasilania reaktorów plazmowych: a – charakterystyka obwodu zasilania elektrody zapłonowej, b – charakterystyka obwodu zasilania elektrod roboczych.

Na podstawie charakterystyk zewnętrznych zasilacza w konfiguracji do pracy z reaktorem plazmowym, przedstawionych na rysunku 6.19, stwierdza się, że oba obwody: zasilania elektrod roboczych i zasilania elektrody zapłonowej, mają charakterystyki prądowo-napięciowe, które zapewniają pewny zapłon wyładowania w reaktorze, jego podtrzymanie w takcie cyklu pracy przy równoczesnym ograniczeniu prądu w obu uzwojeniach.

Charakterystyka zewnętrzna badanego zasilacza zbliżona jest do tej jaką cechuje się omówiony w rozdziale 4.1 układ zintegrowany. Z tą różnicą, że w transformatorze pięciokolumnowym z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi wszystkie funkcje zasilacza realizowane są w jednym urządzeniu, natomiast układ zintegrowany składa się z trzech transformatorów jednofazowych, zasilających elektrody robocze reaktora plazmowego, i pracujących w stanie bliskim nasycenia, oraz dodatkowego transformatora realizującego zapłon wyładowania.

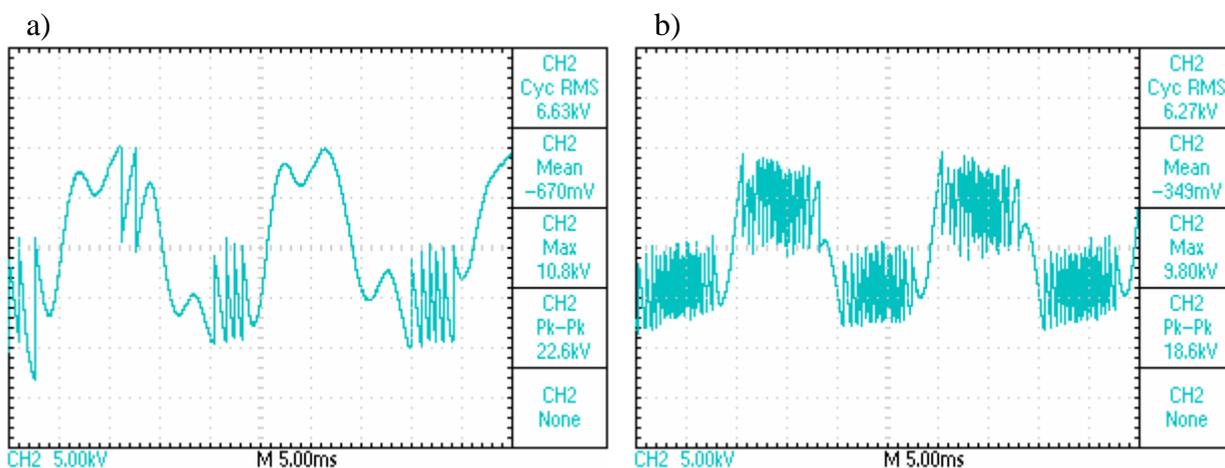
6.4. Zapłon w reaktorze plazmowym

Przeprowadzone próby wykazały, że przy zasilaniu układu zapłonowego reaktora plazmowego, z jednego uzwojenia kolumny zewnętrznej zasilacza, możliwe jest otrzymanie iskry elektrycznej o długości nie przekraczającej 3 mm. Taka długość iskry może być niewystarczająca do przebicia przestrzeni międzyelektrodowych przy pracy reaktora plazmowego z gazami o wysokich potencjałach jonizacji. Lepsze rezultaty osiąga się przy szeregowym połączeniu obu uzwojeń kolumn zewnętrznych zasilacza. Wówczas, iskra elektryczna, w powietrzu, osiągała długość dochodzącą do 15 mm (rys. 6.20).



Rys. 6.20. Wyładowanie iskrowe występujące w obwodzie składającym się z szeregowo połączonych uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego.

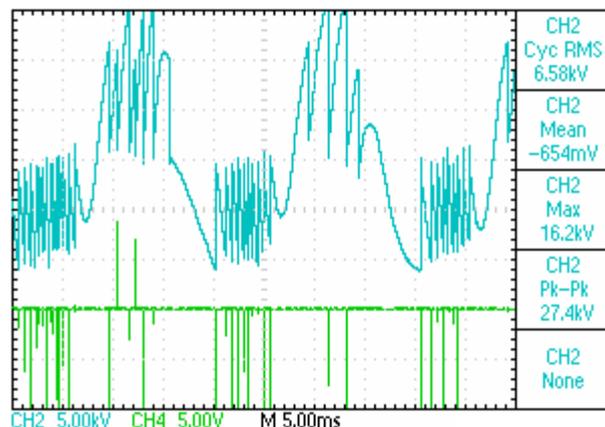
Na rysunkach 6.21a i b przedstawiono przebiegi napięć uzyskane podczas palenia się wyładowania między elektrodą zapłonową a jedną z elektrod roboczych, przy zasilaniu układu zapłonowego reaktora plazmowego z szeregowo połączonych uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego. Przebiegi te zarejestrowano dla dwóch długości przerw międzyelektrodowych tj. 10 mm i 5 mm. Na podstawie uzyskanych oscylogramów można stwierdzić, że dla przerwy międzyelektrodowej wynoszącej 5 mm uzyskuje się znacznie większą liczbę wyładowań w jednym okresie napięcia zasilającego, co przekłada się na większe prawdopodobieństwo wystąpienia zapłonu wyładowania elektrycznego pomiędzy roboczymi elektrodami reaktora plazmowego.



Rys. 6.21. Napięcie między elektrodami zapłonowymi w trakcie palenia się iskry elektrycznej: a – przerwa międzyelektrodowa 10 mm, b – przerwa międzyelektrodowa 5 mm.

Przy współpracy transformatora pięciokolumnowego z trójfazowym reaktorem plazmowym z elektrodą zapłonową ważnym zagadnieniem jest charakter wyładowania, występującego po przebiciu przerwy między elektrodą zapłonową a elektrodą roboczą. Pojawienie się wyładowania w przerwie międzyelektrodowej powoduje zamknięcie obwodu składającego się z szeregowo ze sobą połączonych uzwojeń kolumn zewnętrznych i uzwojenia fazowego. Włączenie uzwojeń fazowych do obwodu zapłonowego nie stwarza ryzyka przeciążenia prądowego uzwojeń kolumn zewnętrznych.

Na rysunkach 6.22 przedstawiono oscylogramy napięć mierzonych między elektrodą zapłonową a elektrodą roboczą reaktora plazmowego w trakcie trwania wyładowania. Dodatkowo, na rysunku przedstawiono przebieg prądu w obwodzie zapłonowym. Na tej podstawie stwierdza się, że wyładowanie zapłonowe uzyskiwane w reaktorze plazmowym ma charakter iskry elektrycznej.

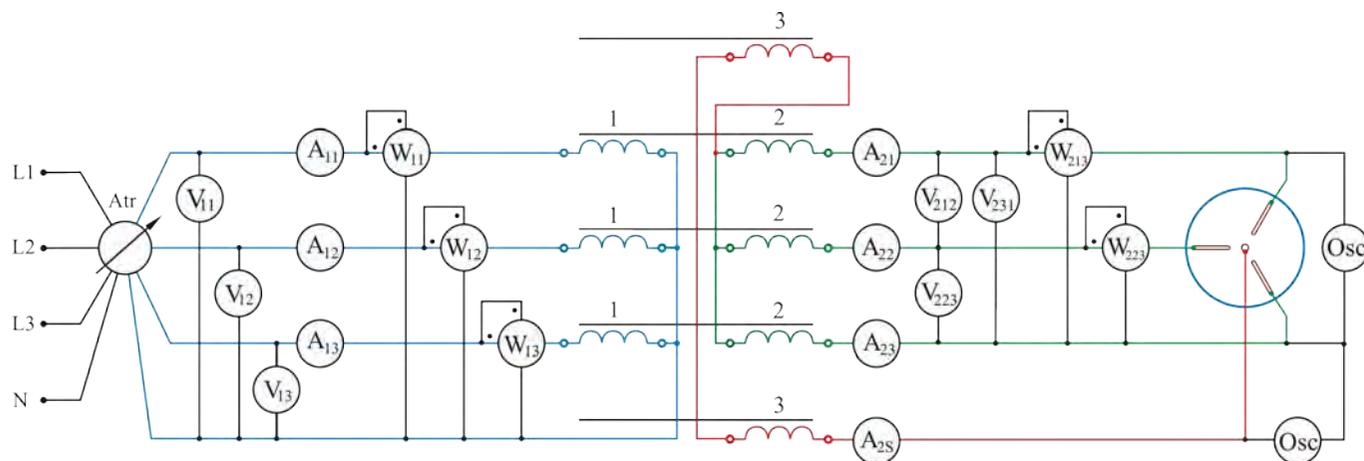


Rys. 6.22. Napięcie (CH2) między elektrodą zapłonową i elektrodą roboczą oraz prąd (CH4) w obwodzie zapłonowym.

Na podstawie przeprowadzonych prób z zapłonem wyładowania elektrycznego w trójfazowym reaktorze plazmowym z elektrodą zapłonową stwierdza się, że pięciokolumnowy transformator z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi daje możliwość uzyskania poprawnego zapłonu wyładowania. Stwierdza się również, iż w rozpatrywanej konstrukcji transformatora następuje naturalne ograniczenia prądu w obwodzie zapłonowym, co zabezpiecza niskoprądowe uzwojenia kolumn zewnętrznych transformatora oraz układ zapłonowy reaktora plazmowego przed przeciążeniem prądowym.

6.5. Obciążenie plazmotronem

Próbie obciążenia zasilacza reaktorem plazmowym przeprowadzono w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 6.23. Mierzono prądy, napięcia i moce po stronie pierwotnej i wtórnej zasilacza oraz wykonano oscylogramy przebiegów czasowych napięć na elektrodach w trakcie pracy reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Pomiary wykonano dla wyładowania palącego się w argonie i azocie a wyniki zestawiono w tabelicy 34.

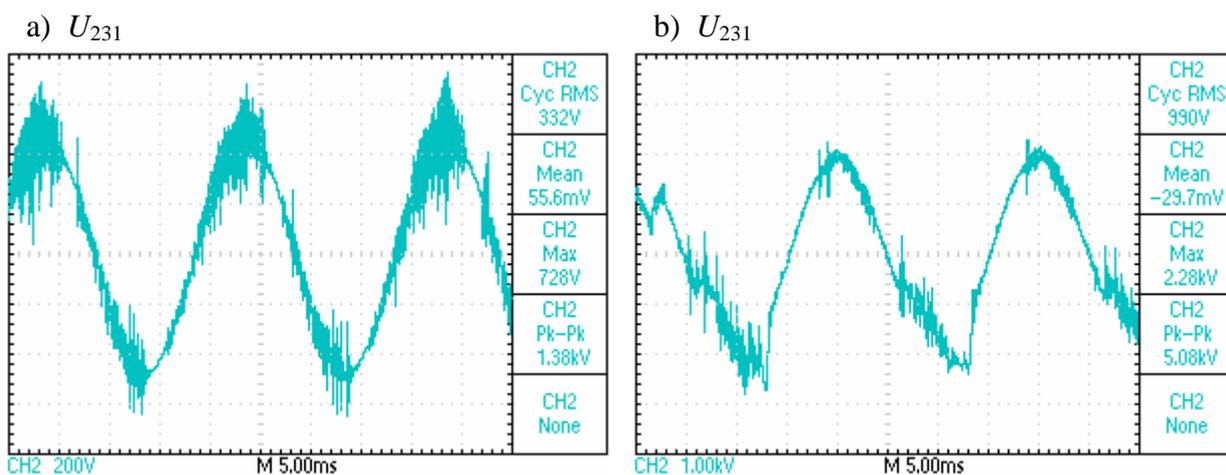


Rys. 6.23. Układ do próby obciążenia zasilacza reaktorem plazmowym.

Tablica 34. Pomiary z próby obciążenia reaktorem plazmowym.

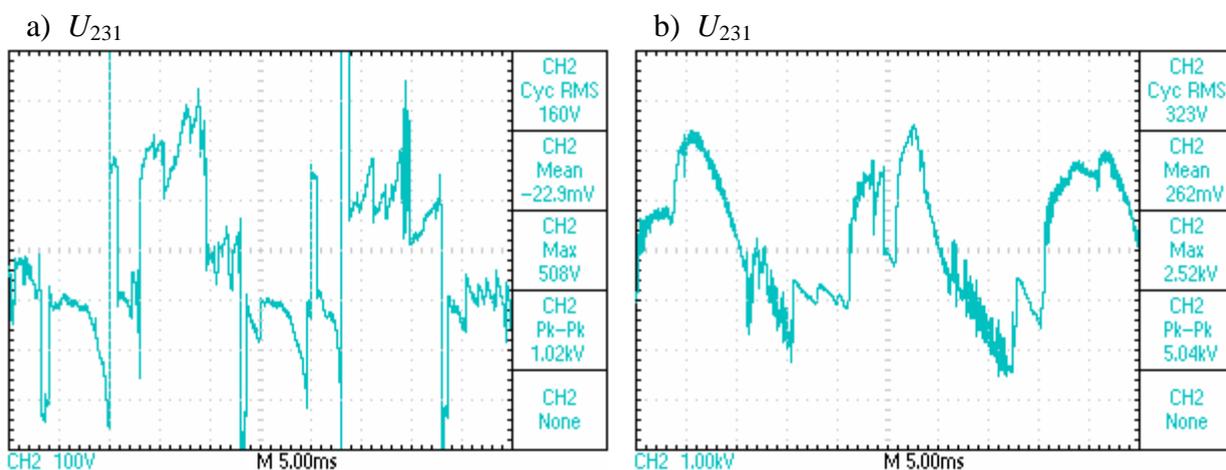
Argon																		
Lp.	U_{11}	U_{12}	U_{13}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	U_{212}	U_{223}	U_{231}	I_{21}	I_{22}	I_{23}	I_{2s}	P_{213}	P_{223}
	V	V	V	A	A	A	W	W	W	V	V	V	A	A	A	mA	W	W
1	30	30	30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	340	340	340	0,0	0,0	0,0	557	0,0	0,0
2	40	40	40	3,0	3,0	2,5	60	80	40	360	355	360	0,3	0,5	0,4	723	40	50
3	50	50	50	9,0	9,5	8,0	200	240	200	320	300	310	1,1	1,4	1,2	594	110	100
4	60	60	60	12,0	14,0	12,0	400	400	360	300	290	300	1,6	1,8	1,5	522	155	160
5	70	70	70	15,0	16,5	15,0	580	580	560	280	275	290	2,2	2,4	2,1	450	220	225
6	80	80	80	17,5	19,0	18,0	700	800	760	260	255	265	2,7	2,8	2,6	363	255	260
7	90	90	90	20,5	21,0	22,5	900	900	900	260	260	265	3,0	3,2	3,1	336	300	310
Azot																		
Lp.	U_{11}	U_{12}	U_{13}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	U_{212}	U_{223}	U_{231}	I_{21}	I_{22}	I_{23}	I_{2s}	P_{21}	P_{22}
	V	V	V	A	A	A	W	W	W	V	V	V	A	A	A	mA	W	W
1	130	130	130	9,0	10,0	8,0	320	500	200	900	940	910	1,2	1,4	1,1	510	415	430
2	140	140	140	20,0	19,0	18,0	1000	1200	600	350	340	330	2,8	2,7	2,7	460	362	376

Na rysunkach 6.24a i b przedstawiono oscylogramy napięć mierzonych między elektrodami roboczymi reaktora plazmowego odpowiednio dla atmosfery argonu i azotu w stanie jałowym. Pomiary wykonano przy zasilaniu strony pierwotnej transformatora napięciem 30 V dla argonu i 130 V dla azotu, tj. w warunkach gdy na elektrodach roboczych reaktora plazmowego występowało napięcie bliskie napięciu zapłonu wyładowania. Widoczne na oscylogramach szumy związane są z iskrą elektryczną, jaka nieprzerwanie pali się na elektrodzie zapłonowej reaktora plazmowego.



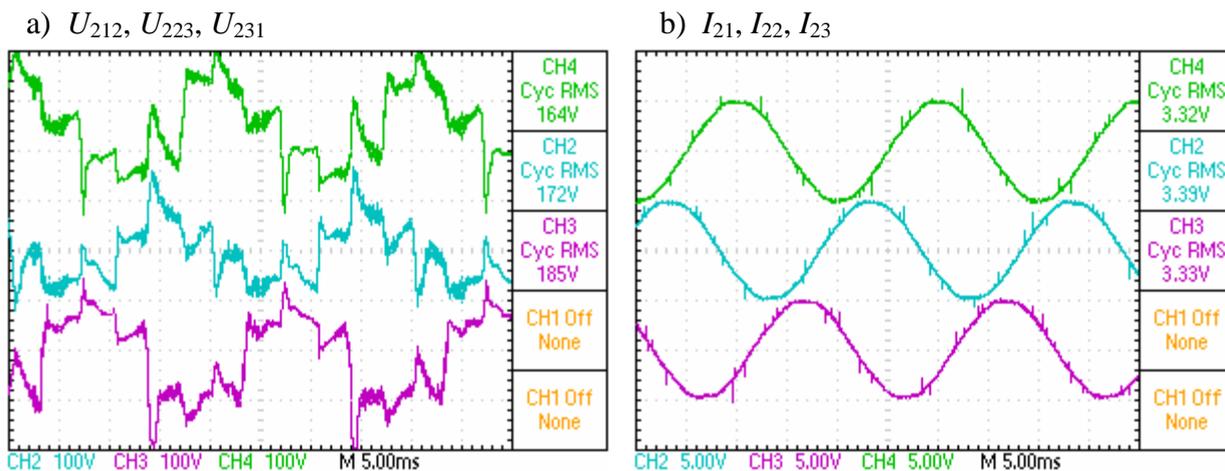
Rys. 6.24. Oscylogram napięcia poprzedzającego zapłon wyładowania między elektrodami roboczymi reaktora plazmowego: a – w atmosferze argonu, b – w atmosferze azotu.

Przebiegi napięć międzyelektrodowych pracującego reaktora plazmowego przedstawia rysunek 6.25. Na rysunku 6.25a przedstawiono przebiegi napięć przy wyładowaniu zachodzącym w atmosferze argonu, zaś na rysunku 6.36b przy wyładowaniu palącym się w azocie.

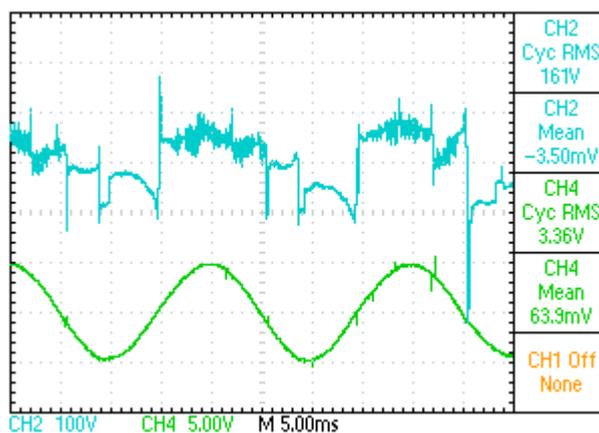


Rys. 6.25. Oscylogram napięcia między elektrodami roboczymi reaktora plazmowego: a – wyładowanie w argonie, b – wyładowanie w azocie.

Mimo silnego odkształcenia od sinusoidy napięć fazowych strony wtórnej zasilacza, pracującego przy obciążeniu reaktorem plazmowym (rys. 6.26a), prąd strony wtórnej wszystkich faz zasilacza zachowuje przebieg sinusoidalny (rys. 6.26b). W oscylogramach prądu nie obserwuje się również, charakterystycznych dla łuków intensywnie chłodzonych, przerw bezprądowych w okolicach przejścia prądu przez zero. Nie występuje również przesunięcie fazowe między prądem a napięciem 6.27, co wskazuje na rezystancyjny charakter odbiornika, jakim jest trójfazowy reaktor plazmowy.

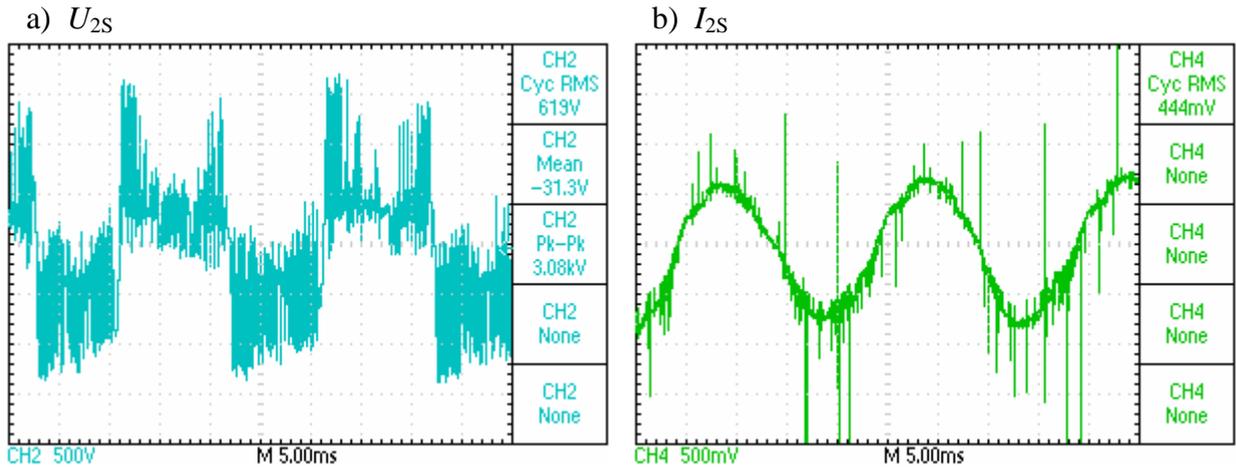


Rys. 6.26. Przebiegi napięć fazowych (a) i prądów fazowych (b) strony wtórnej zasilacza przy obciążeniu reaktorem plazmowym.



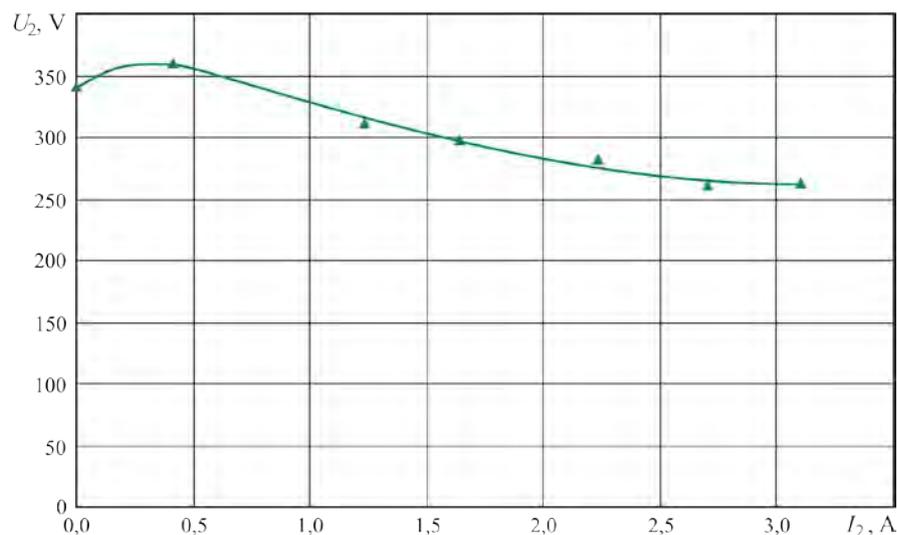
Rys. 6.27. Przebieg napięcia (CH2) i prądu (CH4) strony wtórnej jednej fazy zasilacza przy obciążeniu reaktorem plazmowym.

Na rysunku 6.28 przedstawiono przebieg napięcia zapłonowego między elektrodą zapłonową a jedną z elektrod roboczych reaktora plazmowego (rys 6.28a) oraz przebieg prądu w obwodzie zapłonowym zasilacza (rys. 6.28b).

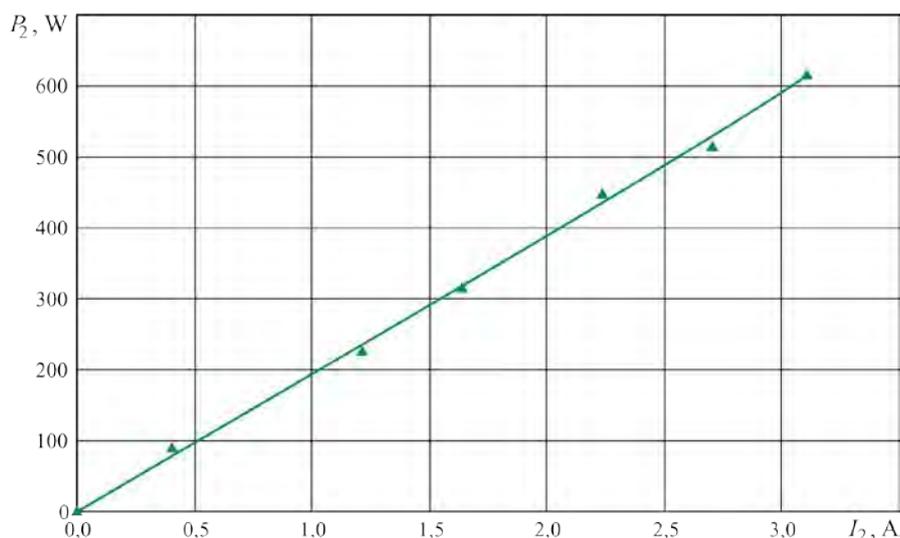


Rys. 6.28. Przebieg napięcia zapłonowego (a) i prądu w obwodzie zapłonowym zasilacza (b) w czasie pracy reaktora plazmowego.

Na podstawie pomiarów zamieszczonych w tabeli 34 wykreślono charakterystyki zmian napięcia łuku i mocy wyładowania w trójfazowym reaktorze plazmowym zasilanym z transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi (rys. 6.29 i 6.30). Napięcie przestrzeni międzyelektrodowej pracującego reaktora plazmowego stabilizuje się na poziomie 260 V przy zasilaniu elektrod roboczym prądem większym od 2,5 A. Zgodnie więc z podaną w rozdziale 3, charakterystyką 3.3, stabilny zakres pracy reaktora z argonem i przy zasilaniu go z omawianej konstrukcji transformatora obejmuje prądy powyżej 2,5 A. Natomiast moc wyładowania w reaktorze plazmowym pracującym z argonem zmienia się liniowo w całym zakresie zmian prądu zasilającego elektrody robocze (rys. 6.30).



Rys. 6.29. Napięcie międzyelektrodowe pracującego reaktora plazmowego w funkcji prądu zasilającego elektrody robocze.

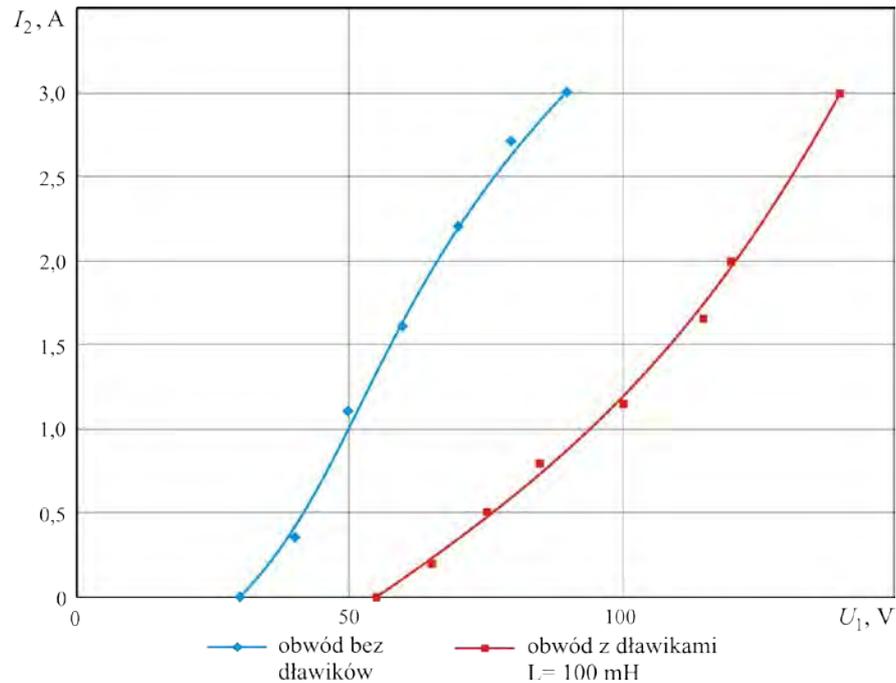


Rys. 6.30. Moc wyładowania w reaktorze plazmowym w funkcji prądu zasilającego elektrody robocze.

Przy pracy reaktora plazmowego z niektórymi gazami charakterystyka prądowo-napięciowa uzwojeń fazowych zasilacza może okazać się zbyt sztywne. W takim przypadku poprawę współpracy transformatora pięciokolumnowego obciążonego reaktorem plazmowym z siecią zasilającą można uzyskać przez włączenie w obwód zasilacza dławików ograniczających prąd.

Włączenie dławików po stronie pierwotnej zasilacza nie jest wskazane, bowiem wiąże się z wystąpieniem na nich spadków napięcia, o które pomniejszone zostaje napięcie na uzwojeniach pierwotnych transformatora. Pociąga to za sobą obniżenie wartości strumieni zamykających się przez kolumny zewnętrzne transformatora pięciokolumnowego, co przekłada się na mniejszą wartość napięć indukowanych w uzwojeniach tych kolumn i pogarsza warunki zapłonu wyładowania w reaktorze. Korzystniejszym rozwiązaniem jest włączenie dławików w obwód wtórny zasilacza. Tym sposobem uzyskuje się znaczne ograniczenie wartości prądu po obu stronach transformatora bez wywierania negatywnego wpływu na napięcie zapłonowe, indukowane w uzwojeniach kolumn zewnętrznych transformatora.

Na rysunku 6.31 przedstawiono charakterystyki prądowe strony wtórnej zasilacza w funkcji zmian napięcia strony pierwotnej transformatora przy włączonych w obwód dławikach o indukcyjności 100 mH oraz dla obwodu bez dławików. Charakterystyki te dotyczą zasilania reaktora plazmowego pracującego z argonem.



Rys. 6.31. Prąd strony wtórnej transformatora w funkcji napięcia zasilającego dla obwodu bez dławików i z dławikami (wyładowanie w argonie).

Znając skład chemiczny gazu z jakim w procesie technologicznym pracuje reaktor plazmowy można na etapie projektowania zasilacza wyeliminować konieczność stosowania dławików przez takie zaprojektowanie uzwojeń fazowych transformatora, by osiągnąć odpowiednią wartość reaktancji rozproszenia.

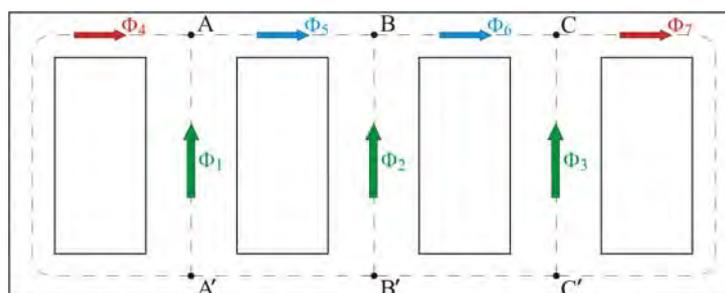
7. Zalecenia do projektowania zasilaczy trójfazowych na rdzeniach zwijanych

Projektowanie zasilaczy łukowych reaktorów plazmowych sprowadza się w zasadzie do wyznaczania parametrów konstrukcyjnych trójfazowego transformatora pięciokolumnowego z rdzeniem zwijanym i pod tym względem nie różni się od projektowania zwykłych transformatorów, dlatego też nie będzie tu szczegółowo omawiane. Przy wyborze materiału na rdzeń oprócz stosowanego w projektowaniu transformatorów kryterium strat mocy w stali i prądu magnesującego, uwzględniać należy wartość wyższych harmonicznych indukcji. Zbyt duża zawartość trzeciej harmonicznej znacznie odkształca strumienie magnetyczne zamykające się w kolumnach zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego, co może wpłynąć na pogorszenie warunków zapłonu wyładowania w reaktorze plazmowym. Materiał z jakiego wykonany jest rdzeń transformatora może także wpływać na charakter ślizgającego się wyładowania łukowego, jak to przedstawiono w rozdziale 3. W sposób szczególny należy potraktować zapewnienie

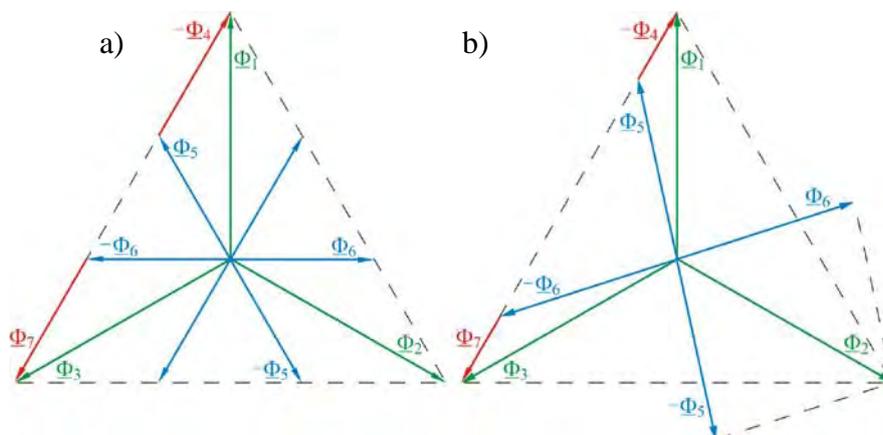
wymaganej reaktancji rozproszenia w projektowanych transformatorach, która powinna wynosić około 20-30 %. Jest to wartość wyższa od stosowanej w transformatorach energetycznych i niższa niż w transformatorach spawalniczych. Taką wartość reaktancji trudno jest uzyskać w konstrukcji uzwojeń współśrodkowych, gdzie nie przekracza ona 15 %, ani w konstrukcji o uzwojeniach rozdzielonych, gdzie przekracza na ogół 60 %.

7.1. Rdzeń transformatora

Przy projektowaniu transformatorów powierzchnię czynną kolumny rdzenia oblicza się ze wzorów Richtera, Keshe'go bądź na podstawie napięcia zwojowego, a następnie wyznacza pozostałe wymiary rdzeni, tj. wysokość kolumn, przekrój i długość jarzm. Należy zwrócić szczególną uwagę na właściwy dobór indukcji w poszczególnych częściach obwodu magnetycznego. Jeżeli przyjmimy oznaczenia strumieni w rdzeniu transformatora trójfazowego pięciokolumnowego jak na rysunku 7.1, wówczas wykres fazorowy będzie zgodny z rysunkiem 7.2.

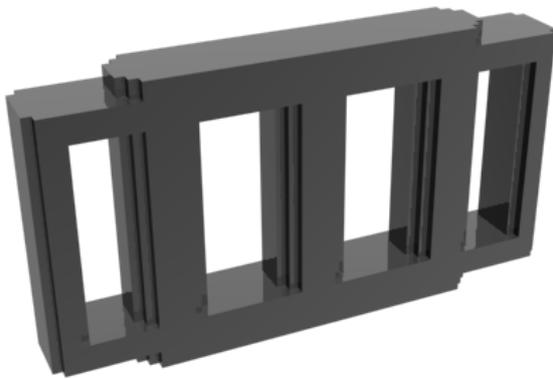


Rys. 7.1. Oznaczenie strumieni w rdzeniu transformatora pięciokolumnowego.

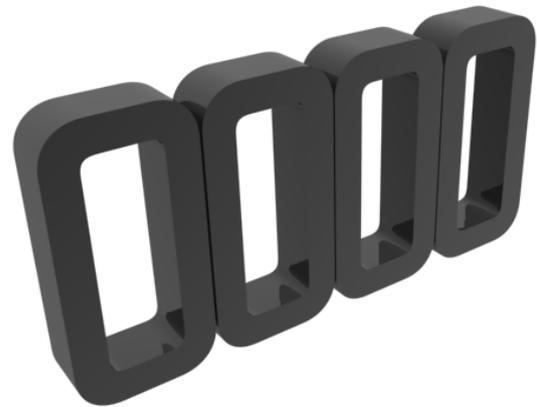


Rys. 7.2. Wykres fazorowy pierwszych harmonicznych strumieni transformatora trójfazowego pięciokolumnowego: a – przypadek w którym pierwsze harmoniczne strumieni wszystkich odcinków jarzmowych są sobie równe, b – przypadek ogólny.

Przy założeniu, że strumienie kolumn fazowych są sobie równe $\Phi_m = \Phi_{m1} = \Phi_{m2} = \Phi_{m3}$, z wykresu fazorowego wynika, że strumienie kolumn zewnętrznych transformatora $\Phi_{m4} = \Phi_{m7}$ mogą zmieniać się w granicach od 0 do $\Phi_m \sqrt{3}/2$, zaś strumienie jarzm $\Phi_{m5} = \Phi_{m6}$ od Φ_m do $\Phi_m/2$. Przypadek, w którym $\Phi_{m4} = \Phi_{m7} = 0$ oraz $\Phi_{m5} = \Phi_{m6} = \Phi_m$ odpowiada zwykłemu transformatorowi trójkolumnowemu. Rozpływ strumieni w częściach jarzmowych transformatora pięciokolumnowego zależy od permeancji odcinków, w których te strumienie występują. Z kolei permeancje te zależą od długości, przekrojów i przenikalności magnetycznych odcinków magnetowodu. Na rysunku 7.3 przedstawiono najczęściej budowany rdzeń transformatora pięciokolumnowego o niejednakowych przekrojach odcinków jarzmowych.



Rys. 7.3. Rdzeń transformatora trójfazowego pięciokolumnowego o niejednakowych przekrojach odcinków jarzmowych.



Rys. 7.4. Rdzeń transformatora pięciokolumnowego wykonany z rdzeni zwijanych.

W pracy, do konstrukcji obwodu magnetycznego transformatora pięciokolumnowego, zaproponowano wykorzystanie rdzeni zwijanych ciętych. Efektem ich zastosowania jest jednakowy przekrój wszystkich części jarzmowych i kolumn zewnętrznych rdzenia transformatora, równy połowie przekroju kolumny fazowej. Taki stosunek przekrojów jest zgodny z praktyką projektową, gdyż niekiedy buduje się rdzenie transformatorów pięciokolumnowych dużej mocy posiadające jednakowe przekroje wszystkich odcinków jarzmowych, równe połowie przekroju kolumny uzwojonej.

Konstrukcja obwodu magnetycznego bazująca na rdzeniach zwijanych (rysunek 7.4) sprawia, że na styku dwóch sąsiadujących ze sobą rdzeni obwodu magnetycznego, w kolumnach fazowych, występują pionowe szczeliny powietrzne. Szczeliny te poszerzają się w częściach jarzmowych powodując brak ich ciągłości. Mimo pewnych cech negatywnych obwodu magnetycznego z rdzeni zwijanych, do których należy zaliczyć brak możliwości wpływania na rozkład indukcji w jarzmach transformatora na etapie jego

projektowania, poprzez dobór przekrojów poszczególnych części rdzenia, wykorzystywanie rdzeni zwijanych znajduje uzasadnienie w przypadku transformatorów małej mocy. Rdzenie zwijane są tanie i ogólnie dostępne, a transformator zbudowany na takich rdzeniach jest prosty, łatwy w montażu oraz spełnia wymagania jakie stawiają zasilaczom łukowe reaktory plazmowe ze ślizgającym się łukiem.

7.2. Reaktancja zwarcia

Wyładowania łukowe w reaktorach plazmowych, palą się najczęściej między elektrodami umieszczonymi w ustalonej odległości i w ośrodkach o stałym ciśnieniu. W tych warunkach napięcie łuku praktycznie nie zależy od zmian prądu w szerokim zakresie. Dlatego też ograniczenie wartości prądu, od której zależy moc wydzielana w wyładowaniu łukowym, musi następować poza samym wyładowaniem. W przypadku reaktorów plazmowych zasilanych prądem przemiennym, gdy przy każdym przejściu prądu przez zero, następuje zgaszenie wyładowania, ważnym zagadnieniem jest skrócenie przerw bezprądowych. Przerwy w przepływie prądu powodują dejonizację przestrzeni międzyelektrodowych, pogarszają stabilność pracy reaktora plazmowego oraz jakość generowanej w nim plazmy.

Jednym ze sposobów ograniczania wartości prądu pobieranego przez reaktor plazmowy jest włączenie dodatkowej rezystancji w obwód z łukiem. Jednak przy takim rozwiązaniu występują przerwy w przepływie prądu a sprawność urządzenia łukowego jest stosunkowo mała. Z kolei zastosowanie kondensatora jako ogranicznika prądu powoduje oscylacje i niestabilne płonienie łuku. Dlatego też, jedyną możliwością ograniczenia prądu jest wykorzystanie indukcyjności, bądź to w postaci dławików włączonych dodatkowo w obwód z łukiem, bądź też przez odpowiednie zaprojektowanie transformatora zasilającego urządzenie łukowe.

Stosowanie dławików po stronie pierwotnej transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi nie jest wskazane gdyż występujące na nich spadki napięcia przekładają się bezpośrednio na wartości napięć indukowanych w uzwojeniach kolumn zewnętrznych, co istotnie pogarsza warunki do zapłonu wyładowania w reaktorze plazmowym i może prowadzić do wyłączenia reaktora. Jedyną możliwością wykorzystania dławików jest włączenie ich w obwód wtórny transformatora, jednak takie rozwiązanie niepotrzebnie komplikuje układ zasilania reaktorów plazmowych i pogarsza sprawność. Dlatego, przy projektowaniu układów zasilania reaktorów

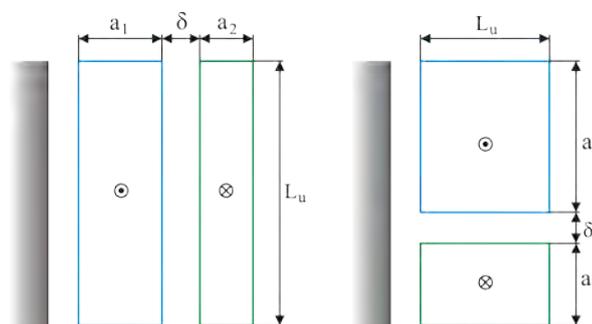
plazmowych, ważnym zagadnieniem jest takie ukształtowanie uzwojeń fazowych strony pierwotnej i wtórnej i ich rozmieszczenie na rdzeniu, aby uzyskać wymaganą wartość reaktancji rozproszenia.

W transformatorze pięciokolumnowym z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi należy brać pod uwagę dwie reaktancje rozproszenia:

- reaktancję rozproszenia uzwojeń fazowych X_r ,
- reaktancję rozproszenia uzwojeń kolumn zewnętrznych X_{rs} .

Każda z wymienionych reaktancji odgrywa istotną i właściwą sobie rolę w układzie zasilania łukowego reaktora plazmowego. Reaktancja rozproszenia uzwojeń fazowych transformatora musi być tak dobrana, by prąd wyładowania głównego między elektrodami roboczymi reaktora osiągał wartość właściwą dla prowadzonego procesu plazmowego. Zbyt duża wartość tej reaktancji ograniczyłaby moc urządzenia plazmowego, zbyt mała prowadziła by do wzrostu prądu ponad wymaganą wartość. Od uzwojeń zasilających obwód zapłonowy reaktora plazmowego wymaga się, z kolei, by następowało w nich możliwie jak największe ograniczenie wartości prądu, a charakterystyka prądowo-napięciowa była szybko opadająca (miękka). Dlatego też wartość reaktancji rozproszenia uzwojeń umieszczonych na zewnętrznych kolumnach transformatora pięciokolumnowego, które zasilają układ zapłonowy, powinna mieć możliwie największą wartość.

Reaktancję rozproszenia uzwojeń fazowych zasilających elektrody robocze kształtuje się poprzez odpowiednie rozmieszczenie względem siebie uzwojenia pierwotnego i wtórnego na kolumnach transformatora. Na rysunku 7.5 przedstawiono oznaczenia niezbędne do obliczania reaktancji rozproszenia przy współśrodkowym i krążkowym wykonaniu uzwojeń.



Rys. 7.5. Oznaczenia do obliczenia reaktancji rozproszenia; a – symetrycznego uzwojenia współśrodkowego, b – elementarnego uzwojenia krążkowego.

Dla przedstawionego na rysunku 7.5 uzwojenia współśrodkowego oraz elementarnego uzwojenia krążkowego reaktancja rozproszenia jednej fazy wyrażana jest wzorem [78]:

$$X_r = 2\pi\mu_0 f z^2 \frac{l_{sr}}{L_u} k \delta', \quad (7.1)$$

gdzie k jest współczynnikiem Rogowskiego którego wartość wyznaczyć można z zależności:

$$k = 1 - \frac{a_1 + \delta + a_2}{\pi L_u}, \quad (7.2)$$

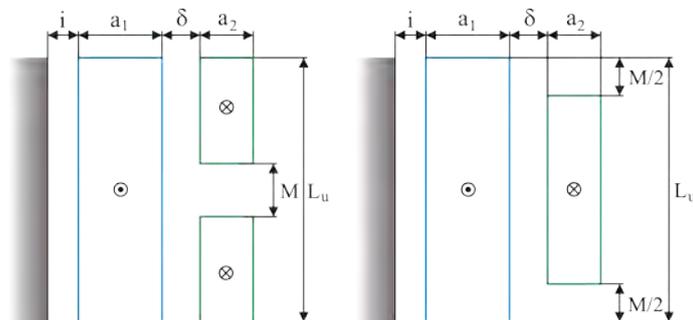
bądź też odczytać z tablic w zależności od rozmiarów uzwojeń. Dla normalnych konstrukcji uzwojeń wartość tego współczynnika wynosi od 0,94 do 0,96. Występujący we wzorze 7.1 współczynnik δ' jest szczeliną zastępczą, którą wyraża równanie:

$$\delta' = \frac{a_1}{3} + \delta + \frac{a_2}{3}. \quad (7.3)$$

Najwyższą wartość reaktancji rozproszenia uzyskuje się w przypadku uzwojeń krążkowych. Gdy występuje jeden krążek uzwojenia pierwotnego i jeden krążek uzwojenia wtórnego reaktancja zwarcia jest na tyle wysoka, że w przypadku konwencjonalnych transformatorów powoduje niedopuszczalnie dużą stratę napięcia. Zmieniając liczbę krążków można zmieniać wartość reaktancji w szerokich granicach. Dla uzwojenia krążkowego symetrycznego o n krążkach reaktancja zwarcia wyrażana jest wzorem [78]:

$$X_r = \frac{\pi\mu_0}{n} f z^2 \frac{l_{sr}}{L_u} k \delta'. \quad (7.4)$$

W uzwojeniach współśrodkowych można również w pewnym stopniu wpływać na wartość reaktancji rozproszenia przez wprowadzenie asymetrii przestrzennej tych uzwojeń. Możliwe do wykorzystania konfiguracje asymetrycznych uzwojeń współśrodkowych przedstawia rysunek 7.6.



Rys. 7.6. Asymetria uzwojenia współśrodkowego.

W przypadku asymetrycznych uzwojeń współśrodkowych, reaktancja rozproszenia równa jest sumie reaktancji X_r uzwojenia współśrodkowego symetrycznego (wzór 7.1) oraz dodatkowej reaktancji rozproszenia X_{rd} wyrażonej wzorem [78]:

$$X_{rd} = \frac{1}{6} \pi \mu_0 f z^2 \frac{M^2}{L_u} \frac{l_{sr}}{L_{pop}}, \quad (7.5)$$

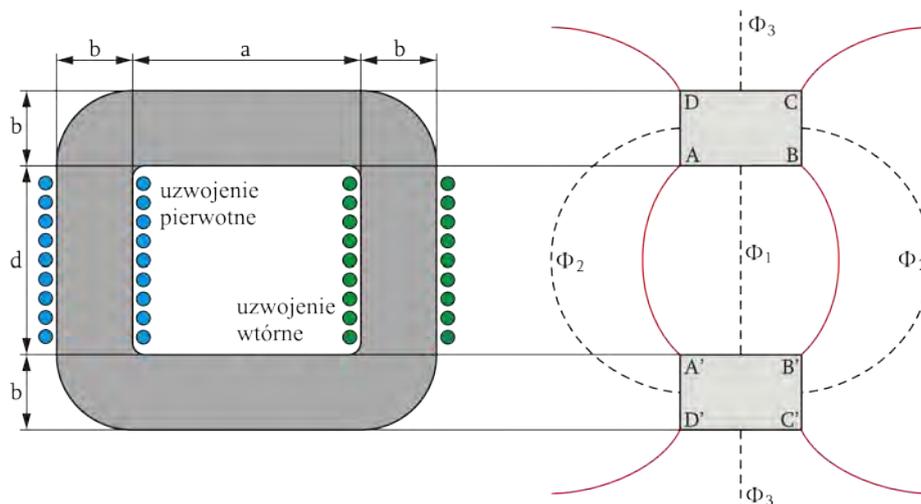
gdzie L_{pop} jest średnią długością linii sił pola poprzecznego zależną od stosunku a_2/L_u . Dla $a_2/L_u > 0,35$ długość L_{pop} wyznacza się z równania:

$$L_{pop} = \frac{a_2}{k}, \quad (7.6)$$

zaś dla $a_2/L_u < 0,35$ średnią długość linii sił pola poprzecznego wyznacza się z zależności:

$$L_{pop} = \frac{L_u}{2\pi} + \frac{a_1 + \delta + a_2}{2} + i. \quad (7.7)$$

Uzwojenia kolumn zewnętrznych zasilacza, ze względu na swoje rozmieszczenie na rdzeniu, tworzą wraz z uzwojeniami pierwotnymi układ uzwojeń rozdzielonych. W celu obliczenia reaktancji zwarcia i napięcia zwarcia w układach z rozdzielonymi uzwojeniami dokonuje się, zgodnie z obrazem pola magnetycznego, podziału całkowitego strumienia rozproszenia na trzy strumienie składowe, jak to przedstawiono na rysunku 7.7 [89].



Rys. 7.7. Wymiary rdzenia i podział strumienia jarzmowego na poszczególne składowe [89].

Wyróżnia się więc następujące strumienie:

- strumień Φ_1 między powierzchniami wewnętrznymi AB-A'B' obydwu jarzm ograniczony liniami sił AA' i BB'.
- strumień Φ_2 między bocznymi powierzchniami AD-A'D' i BC-B'C' obydwu jarzm ograniczony liniami sił AA', DD' oraz BB', CC'.

- strumień Φ_3 między zewnętrznymi powierzchniami CD-C'D' jarzm ograniczony jednostronnie liniami sił CC' i DD' a z drugiej strony nieograniczony.

Całkowita permeancja jest sumą permeancji trzech wymienionych obszarów przez które przenikają strumienie Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 :

$$A = A_1 + A_2 + A_3. \quad (7.8)$$

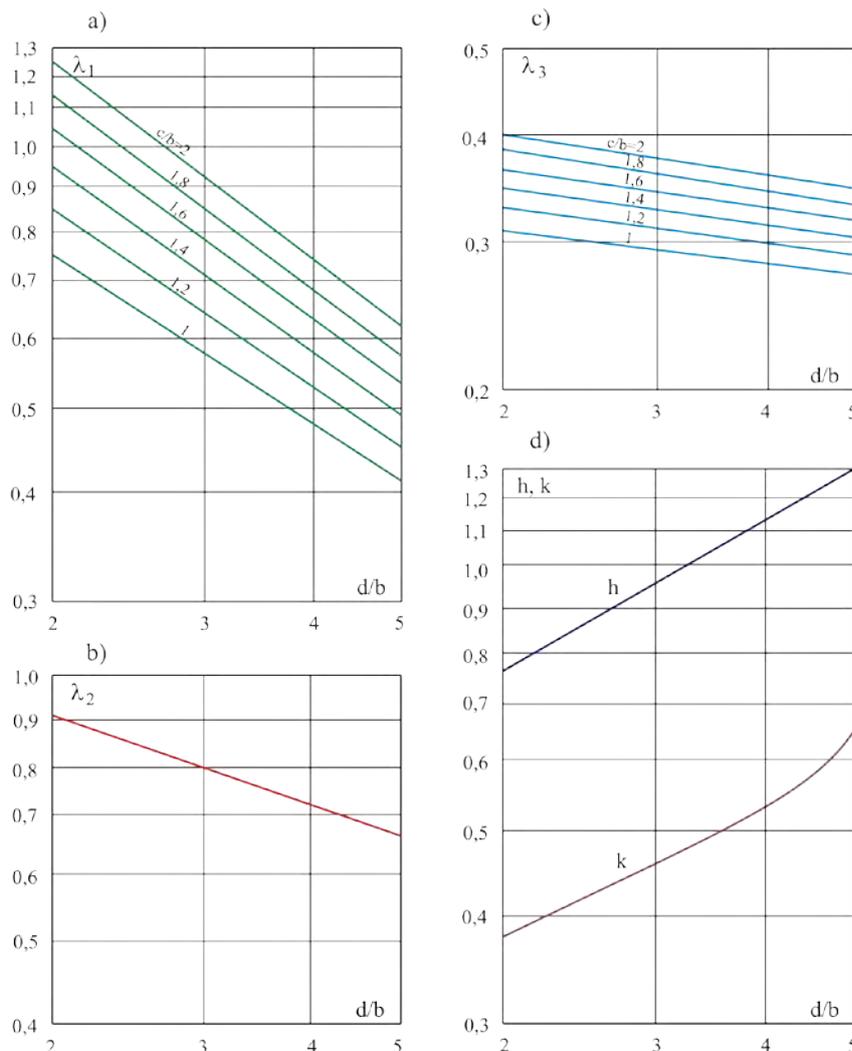
Permeancje poszczególnych obszarów można obliczyć stosując następujące wyrażenia:

$$A_1 = a\lambda_1, \quad (7.9)$$

$$A_2 = [a + b(2 + \pi h) + c]\lambda_2, \quad (7.10)$$

$$A_3 = [a + b(1 + \pi k) + c]\lambda_3. \quad (7.11)$$

Gdzie przewodności magnetyczne właściwe λ_1 , λ_2 , λ_3 wyznacza się z wykresów przedstawionych na rysunku 7.8 na podstawie znajomości proporcji między wymiarami rdzenia. (7.12)



Rys. 7.8. Wykresy do obliczania przewodności magnetycznych właściwych λ_1 , λ_2 , λ_3 dla strumienia jarzmowego [89].

Uwzględniając zależność 7.8 oraz wzory 7.9, 7.10 i 7.11 można napisać wyrażenie na reaktancję rozproszenia w postaci:

$$X_{rs} = \frac{8\pi^2}{10} f z 110^{-8}.$$

8. Uwagi i wnioski końcowe

Reaktory plazmowe są odbiornikami o szczególnych cechach i właściwą ich pracę zapewnić mogą specjalne układy zasilania, wyspecjalizowane do współpracy z konkretnym typem reaktora plazmowego. Wybór najkorzystniejszego wariantu układu zasilania wymaga rozważenia szeregu, niekiedy przeciwstawnych, wymagań, jakie stawiają względem siebie reaktor plazmowy i jego układ zasilania. Odpowiednio wykonany transformator jest najprostszym, najmniej zawodnym i najbardziej ekonomicznym układem zasilania łukowych reaktorów plazmowych. Stosując różne połączenia transformatorów można zasilac układy dwuelektrodowe, trójelektrodowe i wieloelektrodowe reaktorów plazmowych.

Analiza pracy transformatora pięciokolumnowego w układzie zasilania łukowych reaktorów plazmowych, której wyniki przedstawiono w niniejszej pracy, obejmuje następujące zagadnienia:

- przegląd wybranych konstrukcji łukowych reaktorów plazmowych stosowanych w przemyśle od wielu lat oraz konstrukcji reaktorów dających nadzieję na ich implementację w rozwijanych obecnie technologiach high-tech,
- przedstawienie budowy i zasady działania trójelektrodowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym,
- wyznaczenie charakterystyk reaktora oraz określenie obszaru jego stabilnej pracy dla różnych gazów roboczych,
- zdefiniowanie wymagań stawianych układom zasilania przez trójelektrodowe reaktory plazmowe ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym,
- omówienie modeli wyładowania elektrycznego wykorzystywanych w analizie obwodów z łukiem elektrycznym oraz ich implementację w analizie wyładowań zachodzących w trójelektrodowych reaktorach plazmowych,
- przegląd układów zasilania łukowych reaktorów plazmowych wykorzystujących właściwości obwodów magnetycznych oraz układów zasilania z elementami energoelektronicznymi,

- opracowanie układu zasilania reaktorów plazmowych wykorzystującego specjalną konstrukcję transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi,
- budowę modelu transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi do badań laboratoryjnych,
- projekt i budowę zasilacza trójfazowego reaktora plazmowego,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych zasilacza i wyznaczenie jego charakterystyk,
- opracowanie teoretycznych podstaw projektowania trójfazowych transformatorów pięciokolumnowych z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi przeznaczonych do zasilania łukowych reaktorów plazmowych z układami zapłonowymi.

Ze względu na dużą różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych reaktorów plazmowych nie możliwe jest uszeregowanie ich pod względem stosowanych mocy jednostkowych, napięć i prądów. Nie istnieją też ogólne wytyczne do sposobu projektowania ich układów zasilania. Możliwe jest natomiast określenie charakterystyk energetycznych oraz najbardziej korzystnych obszarów pracy wybranych konstrukcji reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Badania eksperymentalne trójelektrodowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym nasunęły następujące wnioski:

- mimo stosowania w reaktorach plazmowych wydzielonych układów zapłonowych konieczne jest zasilanie elektrod roboczych napięciem o wartości wyższej, niż jest wymagana dla stabilnej pracy reaktora plazmowego,
- w trójelektrodowych reaktorach plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym napięcie stabilnie palącego się wyładowania nie zależy od zmian prądu w szerokim zakresie. W obszarze stabilnej pracy reaktora plazmowego moc wyładowania zależy więc od wartości prądu, jakim zasilane są elektrody robocze,
- minimalna moc z jaką może pracować reaktor plazmowy zależy od składu gazu w jakim zachodzi wyładowanie oraz od prędkości przepływu gazu przez komorę wyładowczą urządzenia.
- duży wpływ na parametry wyładowania w reaktorze ma częstotliwość napięcia zasilającego oraz materiał rdzenia transformatorów zasilających.

Badania pracy reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym wykazała, że wszystkie wymagania stawiane przez te odbiorniki układom zasilania mogą spełniać transformatory pięciokolumnowe z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi.

Transformatory te mogą realizować podstawowe funkcje zasilacza, tj. wstępną jonizację i zapłon wyładowania oraz podtrzymywanie wyładowania głównego między elektrodami roboczymi podczas cyklu pracy reaktora plazmowego, przy równoczesnym ograniczeniu prądu zwarcia i zapewnieniu właściwych parametrów plazmy dla prowadzonych z jej udziałem procesów plazmo-chemicznych.

Przeprowadzona analiza i badania eksperymentalne transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi pozwoliły stwierdzić następujące prawidłowości:

- możliwe jest wykorzystanie strumieni zamykających się w kolumnach zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego do zapłonu wyładowania w reaktorach plazmowych,
- charakterystyka zewnętrzna uzwojonych kolumn zewnętrznych transformatora jest na tyle podatna, że uniemożliwia wystąpienie w układzie zapłonowym reaktora plazmowego wyładowań o dużej mocy. Jest to cecha pożądana gdyż zapobiega przeciążeniu prądowemu i termicznemu układowi zapłonowego oraz uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora,
- występuje naturalna współpraca układu zapłonowego z układem zasilania elektrod roboczych, która zapewnia cykliczny zapłon wyładowania i stabilną pracę reaktora bez występowania przerw bezprądowych,
- wyładowanie elektryczne jakie zachodzi w układzie zapłonowym reaktora plazmowego, zasilanym z uzwojeń kolumn zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego, występuje wielokrotnie w trakcie jednego cyklu pracy reaktora, co istotnie poprawia warunki do zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych reaktora plazmowego,
- konieczne jest kształtowanie charakterystyki zewnętrznej uzwojeń fazowych transformatora poprzez dobranie reaktancji rozproszenia. Wymaganą wartość reaktancji można osiągnąć przez odpowiednie ukształtowanie i rozmieszczenie na rdzeniu uzwojeń transformatora,

Przedstawione w pracy badania eksperymentalne i wyniki analizy transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi przeznaczonego do zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, uzupełnione o metody projektowania tego typu układów zasilania, pozwalają stwierdzić, że osiągnięto cel pracy i udowodniono postawioną na wstępie tezę, że **możliwe jest wykorzystanie strumienia kolumn nieuzwojonych rdzenia pięciokolumnowego transformatora**

trójfazowego do zapłonu wyładowania w reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

Do ważniejszych osiągnięć naukowych zaliczam:

- wyznaczenie charakterystyk i obszarów stabilnej pracy trójfazowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym,
- zaproponowanie wykorzystania energii strumieni zamykających się w kolumnach zewnętrznych transformatora pięciokolumnowego do zapłonu wyładowania w łukowych reaktorach plazmowych,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi, obciążonego łukowym reaktorem plazmowym,
- podanie wskazówek do projektowania transformatorów pięciokolumnowych budowanych na rdzeniach zwijanych z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi, przeznaczonych do zasilania łukowych reaktorów plazmowych z układami zapłonowymi.

Transformatory pięciokolumnowe z uzwojonymi kolumnami zewnętrznymi są sprawnymi zasilaczami łukowych reaktorów plazmowych. Nie wymagają specjalnej obsługi, charakteryzują się brakiem wrażliwości na zakłócenia generowane przez łuk elektryczny oraz możliwością pracy z różnymi gazami plazmotwórczymi, co predysponują tego typu transformatory do zastosowań przemysłowych. Dalsze prace badawcze powinny koncentrować się nad opracowaniem podstaw projektowania układów zasilania dla całej klasy łukowych reaktorów plazmowych oraz nad możliwościami aplikacyjnymi nowych materiałów magnetycznych w konstrukcji obwodów magnetycznych transformatorów zasilających odbiorniki łukowe.

Literatura

- [1] G. Tak, M. Gallagher, S. Gangoli, A. Gutsol, A. Fridman, Use of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma for Air Cleaning and Sterilization, 32nd IEEE International Conference on Plasma Science, June 20-23, 2005, Monterey, California.
- [2] A. Jaworek, T. Czech, A. Krupa, T. Antes, Kierunki rozwoju elektrostatycznych urządzeń do oczyszczania gazów odlotowych, V Konferencja Naukowo-Tachniczna ELEKTROFILTRY 2000, Kraków 14-16 września 2000.
- [3] H. D. Stryczewska, K. Ebihara, Y. Gyoutoku, M. Tachibana, Non-thermal plasma based technology for soil sterilization, 9th International Conference: High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry, Padova, Italy, August 23 – 34, 2004.
- [4] H. D. Stryczewska, K. Ebihara, T. Janowski, Zastosowanie nietermicznej plazmy w procesach sterylizacji, Zrównoważone Systemy Energetyczne – Nowe Kierunki Wytwarzania i Wykorzystywania Energii, Zakopane 12 – 14 października, 2005.
- [5] R. Collantes, T. Gomez, Identification and Modeling of a Three Phase Arc Furnace for Voltage Disturbance Simulation, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 4, Oct. 1997, pp. 1812-1817.
- [6] G. Jang, W. Wang, G. T. Heydt, Development of enhanced electric arc furnace models for transient analysis, Electric Power Components and Systems, 2001, 29(4):1061-1074.
- [7] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli, Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electric Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 4, 1994, pp.2026-2036.
- [8] V. I. Hudym, Z. V. Lesnyak, Mathematical model of electric arc for investigation of thermal electrodynamic processes in steel melting furnaces, Elektrotechnika i Elektronika, tom 24, zeszyt 1, 2005.
- [9] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli, Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electric Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 4, 1994, pp.2026-2036.
- [10] N. Venkatramani, Industrial plasma torches and applications, Current Science, Vol. 83, No. 3, 10 August 2002.
- [11] J. Heberlein, New approaches in thermal plasma technology, Pure Appl. Chem., Vol. 74, No. 3, pp. 327–335, 2002.
- [12] H. Conrads, M. Schmidt, Plasma Sources: Science and Technology, 2000, vol. 9, pp. 441–457.
- [13] Whiting Equipment Canada Inc., <http://www.whiting-equip.com/media/volta%20saf.pdf>, 22 września 2007.
- [14] E. Wilson, M. Kan, A. Mirle, Intelligent Technologies for Electric Arc Furnace Optimization, Process Technology Conference Proceedings, pp. 697-702, New Orleans, Louisiana, November 1998.
- [15] R. Kazała, Analiza zjawisk zakłócających pracę układu regulacji pieca łukowego, Modelowanie i Sterowanie Procesów Elektrotermicznych, Kielce, 24-26 września 2007.
- [16] G. Dosa, A. Kepes, T. Ma and P. Fantin, Computer control of high-power electric furnaces, Challenges in Process Intensification Symposium, 35th Conference of Metallurgists of the Metallurgical Society of CIM, Montreal, Quebec, August 24-29, 1996.
- [17] R. W. Goles, G. A. Whyatt, R. A. Merrill, D. K. Seiler, C. J. Freeman, D. A. Lamar, G. B. Josephson, Engineering-Scale DC Arc Furnace Testing Summary, Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC06-76RLO 1830, September 1998.
- [18] M. Ushio, Plasma application in the steel industry in Japan, Pure & Appl. Chem., Vol. 64, No. 5, pp. 677-683, 1992.
- [19] Stainless Plate Products, Inc., A Brief Overview of Plasma Cutting http://www.sppusa.com/reference/white_paper/wp_pc.pdf, 22 września 2007.
- [20] W. Żurawski, B. Antoszewski, Microstructure of plasma sprayed NiCrBSi Coating, Modelowanie i Sterowanie Procesów Elektrotermicznych, Kielce, 24-26 września 2007.
- [21] L. Pawlowski, The science and engineering of thermal spray coatings, John Wiley & Sons Ltd, Chichester 1995.

- [22] D. Hawley, Improved quality, reduced cost and cycle times, www.sulzer.com/en/Desktopdefault.aspx/tabid-525/545_read-7423, 20 września 2007.
- [23] www.praxair.com, 20 września 2007 r.
- [24] J. P. Huchin, The place of thermal spraying in industry today and for the future, Proc. of the 15th International Thermal Spraying Conference, Nice 1998.
- [25] W. Hongong, W. Liuying, Thermal spraying – application and development trends, Proc. of International Thermal Spray Conference, Basel 2005.
- [26] M. C. Nestler, H. J. Spies, K. Herman, Improvement of coating characteristics and end-use performance of thermal spray coatings through post-treatments like hardening, nitriding or carburizing, Proc. of United Thermal Spray Conference, Düsseldorf 1999.
- [27] S. Gangoli, A. Gutsol, A. Fridman, Applications of Gliding Arc as a Source of Atmospheric Pressure Transitional Plasma, 32nd IEEE International Conference on Plasma Science, June 20-23, 2005, Monterey, California.
- [28] B. Ravary, L. Fulcheri, J.A. Bakken, G. Flamant, F. Fabry "Influence of the electromagnetic forces on momentum and heat transfer in a 3-phase plasma reactor" Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol 19, 1, March 99, Plenum Press.
- [29] T. Matsuura, K. Taniguchi, T. Watanabe, A New Type of Arc Plasma Reactor with Twelve-Phase Alternating Current Discharge for Synthesis of Carbon Nanotubes, Proceedings of 17th International Symposium on Plasma Chemistry, Toronto, Canada, August 7-12, 2005.
- [30] A. Czernichowski, H. Lesueur, 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, Idaho Falls, USA, January 16 – 17, 1991.
- [31] Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, S. D. Popov, A. V. Surov, Gh. V. Nakonechny, Investigation of voltage and current variations in a multiphase AC electric arc system, 12th International Congress on Plasma Physics, 25-29 October 2004, Nice (France).
- [32] M. Kossitsyn, A. Gutsol, A. Fridman, Generation and Diagnostics of Non-Equilibrium Plasma in Gliding Arc Discharge, Electronic Proceedings of 16th International Symposium on Plasma Chemistry, Taormina, Italy, June 22-27, 2003.
- [33] H. D. Stryczewska, A. Sikroski, A. Ruszczyk, G. Komarzyniec, Gliding arc plasma reactor supplied from AC/DC/AC inverter, 18th International Symposium on Plasma Chemistry, Kyoto, Japan, August 26 – 31, 2007, str. CD.
- [34] A. M. Kruczynin, A. Sawicki, Eksperymentalne charakterystyki Elektryczne DC-EAF jako podstawa utworzenia strukturalnego modelu łuku, Modelowanie i Sterowanie Procesów Elektrotermicznych, Kielce, 24-26 września 2007.
- [35] T. Janowski, H. D. Stryczewska, Power and efficiency of the gliding arc plasma reactors, 22nd Symposium on Plasma Physics and Technology, Praha, Czech Republic, June 26 – 29, 2006.
- [36] I. Ene, C. Motoc, M. Rusu; Fractal models for 2D and 3D electric discharge, The First South-East European Symposium on Interdisciplinary approaches in fractal analysis, May 7-10, 2003 Bucharest, Romania.
- [37] R. Kosztaluka; praca zbiorowa; Technika badań wysokonapięciowych; tom 2; WNT 1985.
- [38] A.D. Stokes, W.T. Oppenlander, Electric arcs in open air, J. Phys. D: Appl. Phys. vol 24, 1991, pp26-35.
- [39] J. Kusz, Generowanie plazmy przy powierzchni ferroelektryków, PWN, Warszawa-Wrocław 1978.
- [40] A. Н. Красов, В. М. Миронов, Ю. С. Свирчук: Плазмотроны, конструкции, жарактеристики, расчет. Изд-во Машинстроение, Москва 1993.
- [41] А. В. Николаев: Энергетическая структура плазменно-дуговых металлургических аппаратов. Генераторы потоков электродуговой плазмы. Сб. научных трудов. Под ред. В. Е. Накорякова. Новосибирск 1987.
- [42] A. M. Kruczynin, A. Sawicki: Piece i urządzenia plazmowe, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
- [43] A. V. Gerasimov, A. P. Kirpichnikov, L. A. Rachevskiy, Paradox of von Engel-Steenbeck and channel model of the electric arc, Thermal Science 2005 Volume 9, Issue 1, Pages: 131-138.

- [44] A. V. Gerasimov, A. P. Kirpichnikov, Quasi-equilibrium channel model of a constant current arc, *Thermal Science* 2003 Volume 7, Issue 1, Pages: 101-108.
- [45] L.E. Fisher, Resistance of low-voltage arcs, *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, vol IGA-6, No 6, Nov-Dec 1970, pp 607-616.
- [46] CIGRE WG 13.01, Applications of black box modeling to circuit breakers, *Electra*, no. 149, pp. 41-71, August 1993.
- [47] S. Berger, Mathematical approach to model rapidly elongated free-burning arcs in air in electric power circuits, *ICEC 2006*, 6-9 June 2006, Sendai, Japan, 2006.
- [48] P.H. Schavemaker, L. Van Der Sluis, The arc model blockset, *Proceedings of the Second IASTED International Conference Power and Energy Systems (EuroPES)*, June 25-28, 2002, Crete, Greece.
- [49] V.P. Ignatko, Electric characteristics of AC open heavy-current arcs, *3rd International Symposium on Switching Arc Phenomena*, TU Lodz, Poland, 1977, pp 98-102.
- [50] I. Rusu, J.M. Cormier, L. Lixandru, On the diagnose of a Glidarc plasma reactor by means of electric discharge frequency analysis, *Workshop on Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics*, Specchia, Italy, April 3-7, 2003.
- [51] Z. Ciok, *Modelowanie matematyczne łuku łączeniowego*, PWN, Warszawa 1987.
- [52] M. Wciślik, *Uprozczone modele łuku elektrycznego, Modelowanie i Sterowanie Procesów Elektrotermicznych*, Kielce, 24-26 września 2007.
- [53] C. Królikowski, *Technika łączenia obwodów elektroenergetycznych*, PWN, Warszawa 1990.
- [54] Z. Ciok, *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1983.
- [55] P. H. Schavemaker, L. van der Sluis, An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 580-584, April 2000.
- [56] B. Bowman, P. A. Stafford, S. Alameddine, Unusual arcing phenomena in modern arc furnaces, *7th European Electric Steelmaking Conference*, Venice, Italy, 2002.
- [57] A. M. Kruczynin, A. Sawicki, Wybór stanów pracy AC-EAF na podstawie wskaźników elektrycznych, *Modelowanie i Sterowanie Procesów Elektrotermicznych*, Kielce, 24-26 września 2007.
- [58] R. Collantes, T. Gomez, Identification and modeling of a three phase arc furnace for voltage disturbance simulation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 4, Oct. 1997, pp. 1812-1817.
- [59] S.A. Matson, W.F. Ramirez, The dynamic modeling of an electric arc furnace, *Electric Furnace Conference Proceedings*, vol. 55 (1997), Iron and Steel Society, p675-688.
- [60] B. Boulet, G. Lalli, M. Ajersch; Modeling and control of an electric arc furnace; *American Control Conference*, Denver, Colorado, June 4-6, 2003.
- [61] P. Gardin, C. Soide, A. Dez, I. Guillaume, Use of physical and numerical simulation methods to characterize gas flow in trielectrode arc furnace, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol.19, 4, 1992.
- [62] L.P. Podenok, V.D. Shimanovich, L.I. Sharakovskiy, O.I. Yas'ko, Turbulence of flows with electric arc, *High Temp. Chem. Processes*, 3, 1994, pp409-418.
- [63] W. Xia, L. Fulcheri, J. Gonzales-Aguilar, H. Li, T. M. Gruenberger; Characterization of a 3-phase a.c. free burning arc plasma; *Plasma Science & Technology*, Vol.8, No.2, Mar. 2006.
- [64] O.I. Yas'ko, On the character of turbulence in electric arc, *Academy of Sciences of Belarus Luikov Heat and Mass Transfer*, Preprint 2, Minsk, 1996.
- [65] H. D. Stryczewska, T. Janowski, Energy efficiency of power systems of plasma reactors with arc gliding, *16th European Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases and 5th International Conference on Reactive Plasmas ESCAMPING*, France, Grenoble, July 14 – 18, 2002, Vol. 2. pp. 369-370.
- [66] H. D. Stryczewska, T. Janowski, Supply system for non-thermal plasma reactors, *The First Polish – Japanese Hakowe Group Symposium on Non-Thermal Plasma Processing of Water and Air*, Sopot, Poland, May 29 – 31, 2000, pp. 107-110.
- [67] A. Kurbiel, *Elektrotermiczne urządzenia łukowe*, WNT, Warszawa 1988.
- [68] H. D. Stryczewska, T. Janowski, Integrated supply system of the plasma reactor energised from three phase supply network, *International Symposium on High Pressure Low*

- Temperature Plasma Chemistry HAKONE VII, Greifswald Germany, September 10 – 13, 2000, pp. 518-522.
- [69] T. Janowski, H. D. Stryczewska, Application of the third magnetic flux harmonic of transformer cores in plasma reactors, *Non-Linear Electromagnetics Systems*, V. Kose and J. Sievert (Eds.), IOS Press, 1998.
- [70] T. Janowski, H. D. Stryczewska, Hybrydowy zasilacz plazmotronu do prowadzenia reakcji chemicznych, Patent PL 172170, 1997.
- [71] T. Janowski, H. D. Stryczewska, Zasilacz plazmotronu do prowadzenia reakcji chemicznych, Patent PL 172152, 1997.
- [72] A. Czernichowski, T. Janowski, H. D. Stryczewska, 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.
- [73] T. Janowski, H. D. Stryczewska, M. Mastalarczuk, S. Yamada, K. Bessho, Performances of medium frequency supplying system for plasma reactor, *The Second MAGDA Conference*, Japan, 1993, A-1.
- [74] H. D. Stryczewska, Elektromagnetyczny układ zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, *Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej, Elektryka*, 1998.
- [75] H. D. Stryczewska, T. Janowski, Zasilacz reaktora plazmowego, Patent P-339397, 2000.
- [76] H. D. Stryczewska, Analiza zintegrowanych zasilaczy elektromagnetycznych w urządzeniach wyładowczych, *Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej, Elektryka*, 1996.
- [77] T. Rodacki, A. Kandyda, *Energoelektroniczne układy zasilania plazmotronów prądu stałego*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [78] E. Jezierski, *Transformatory*, WNT, Warszawa 1983.
- [79] A. M. Plamitzer, *Maszyny elektryczne*, WNT, Warszawa 1982.
- [80] J.H. Brunke, K.J. Frohlich, Elimination of transformer inrush currents by controlled switching, *Power Delivery*, IEEE Transactions on Volume 16, Issue 2, Apr 2001.
- [81] A. Basak, A.J. Moses, M.R. Yasin, Flux distribution and loss in a 100 kVA 3-phase wound amorphous transformer core, *Jurnal of Magnetism and Magnetic Materials* 160 (1996) 210-212.
- [82] B. A. Mork, Five-legged wound-core transformer model: Derivation, Parameters, Implementation and Evaluation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, No. 4, pp 1519-1526, October 1999.
- [83] Z. Gacek, M. Soiński, R. Sosiński, Model of a five-limb amorphous core used in a three-phase distribution transformer, *Non-Linear Electromagnetics Systems*, V. Kose and J. Sievert (Eds.), IOS Press, 1998.
- [84] R. Rygał, S. Sieradzki, M. Soiński, Flux distribution in 5 limbs transformer of 160 kVA, *Non-Linear Electromagnetics Systems*, V. Kose and J. Sievert (Eds.), IOS Press, 1998.
- [85] D. Lin, P. Zhou, W.N. Fu, Z. Badics, Z.J. Cendes, A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis, *Magnetics*, IEEE Transactions on Volume 40, Issue 2, March 2004, 1318 - 1321.
- [86] <http://www.stalprodukt.com.pl>, 26.09.2007.
- [87] J. Płoszyńska, *Konstrukcja maszyn elektrycznych, cz. 1. Obliczanie transformatorów energetycznych*, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 1992.
- [88] M. R. Dolatian, and A. Jalilian, Voltage Sag Effect on Three Phase Five Leg Transformers, *International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering*, Volume 1 Number 2 Spring 2007.
- [89] M. Jabłoński, K. Zakrzewski, Analiza pracy transformatorów rozproszonych, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr. 9, Wrzesień 1966.

Publikacje autora dotyczące tematu pracy

- [1] H. D. Stryczewska, G. Komarzyniec, Gliding arc discharge in the triple-electrode system, VIIth Polish National Symposium on Plasma Chemistry, Plasma Chemistry 2002, Kazimierz Dolny, September 16 – 18, 2002, pp. 28-29.
- [2] G. Komarzyniec, H. D. Stryczewska, Transformer supply system of plasma reactors, 4th International Conference Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO-4, Nałęczów, Poland, September 21 – 24, 2003.
- [3] G. Komarzyniec, Analiza możliwości wykorzystania transformatora trójfazowego jako źródła zasilania urządzeń wyładowczych, III Seminarium Doktorantów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, Lublin, czerwiec 2003, str. 87-94.
- [4] G. Komarzyniec, Ślizgające się wyładowanie łukowe – opis matematyczny, Seminarium Doktorantów Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Politechnika Lubelska, Lublin, grudzień 2003.
- [5] H. D. Stryczewska, T. Janowski, G. Komarzyniec, J. Diatczyk, Multi-stage gliding arc reactors for environmental applications, International COE Forum on Plasma Science and Technology, Nagoya, Japan, April 5 – 7, 2004, 269-270.
- [6] G. Komarzyniec, Transformator pięciokolumnowy do zasilania reaktorów łukowych, Materiały V Seminarium Doktorantów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2004, 101-106.
- [7] H. D. Stryczewska, G. Komarzyniec, J. Diatczyk, Reaktory plazmowe z łukiem elektrycznym jako źródło nietermicznej plazmy dla celów technologicznych, Zrównoważone Systemy Energetyczne – Nowe Kierunki Wytwarzania i Wykorzystywania Energii, Zakopane, 12 – 14 października, 2005, str. 216-224.
- [8] A. Wac-Włodarczyk, H. D. Stryczewska, P. Mazurek, G. Komarzyniec, Analiza zaburzeń elektromagnetycznych emitowanych przez urządzenia plazmowe, XXVIII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC – SPETO, Gliwice – Ustroń, 11 – 14 maja, 2005, str. 183-186.
- [9] G. Komarzyniec, H. D. Stryczewska, J. Diatczyk, 5-limb transformer as a power system of arc plasma reactors, International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Nałęczów, Poland, 4 – 7 September, 2005.
- [10] J. Diatczyk, H. D. Stryczewska, G. Komarzyniec, Modeling of plasma temperature distribution, International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Nałęczów, Poland, 4 – 7 September, 2005.
- [11] H. D. Stryczewska, G. Komarzyniec, J. Diatczyk, T. Janowski, Multi-electrode gliding arc plasma reactors Powered from special transformers, The 17th International Symposium on Plasma Chemistry, Toronto, Canada, August 7 – 12, 2005.
- [12] G. Komarzyniec, H. D. Stryczewska, J. Diatczyk, Power system of gliding arc reactors for industrial applications, XXVIIth International Conference on Phenomena in Ionized Gasek ICPIG, Eindhoven, The Netherlands, July 18 – 22, 2005.
- [13] J. Diatczyk, H. D. Stryczewska, G. Komarzyniec, Numerical simulation of temperature distribution of gliding plasma reactor, XXVIIth International Conference on Phenomena in Ionized Gasek ICPIG, Eindhoven, The Netherlands, July 18 – 22, 2005.
- [14] J. Diatczyk, H. D. Stryczewska, G. Komarzyniec, Modeling of the temperature distribution in arc discharge plasma reactor, Journal of Advanced Oxidation Technologies, vol. 9, no 2, July 31, 2006, pp. 174-177.
- [15] G. Komarzyniec, J. Diatczyk, H. D. Stryczewska, Arc plasma reactor power system with 5-limb transformer, Journal of Advanced Oxidation Technologies, vol. 9, no 2, July 31, 2006, pp. 178-181.
- [16] H. D. Stryczewska, G. Komarzyniec, T. Janowski, Five limb transformer as a power system of arc discharge reactor, 3rd Polish-Japanese Hakone Group Symposium on Non-Thermal Plasma Processing of Water and Air, Saga, Japan, September 4 – 8, 2006, pp.77-80.
- [17] G. Komarzyniec, H. D. Stryczewska, T. Janowski, J. Diatczyk, Special Transformers in power system of arc plasma reactors, 1st Central European Symposium on Plasma Chemistry, Gdańsk, May 28 – 31, 2006.

- [18] J. Diatczyk, G. Komarzyniec, H. D. Stryczewska, Determination of the gliding arc discharge critical length, 1st Central European Symposium on Plasma Chemistry, Gdańsk, May 28 – 31, 2006.
- [19] H. D. Stryczewska, G. Komarzyniec, T. Janowski, Five limb transformer as a power system of arc discharge reactor, 10th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry – HAKONE X, Saga, Japan, September 4 – 8, 2006, pp. 107-110.
- [20] H. D. Stryczewska, A. Sikorski, A. Ruszczyk, G. Komarzyniec, Gliding arc plasma reactor supplied from AC/DC/AC inverter, 18th International Symposium on Plasma Chemistry, Kyoto, Japan, August 26 – 31, 2007.
- [21] J. Diatczyk, G. Komarzyniec, H. D. Stryczewska, Warunki generacji nietermicznej plazmy w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – Nauki Techniczne – Elektryka, Modelowanie i Sterowanie Procesów Elektrotermicznych, Kielce, 24 – 26 września, 2007.
- [22] G. Komarzyniec, H. D. Stryczewska, W. Janowski, J. Diatczyk, Wpływ elektrycznych parametrów układu zasilania na charakterystyki reaktorów plazmy łukowej, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – Nauki Techniczne – Elektryka, Modelowanie i Sterowanie Procesów Elektrotermicznych, Kielce, 24 – 26 września, 2007.