

Lubelskie Towarzystwo Naukowe

---

# TECHNOLOGIE NADPRZEWODNIKOWE I PLAZMOWE W ENERGETYCE

Pod redakcją:

Tadeusza Janowskiego  
Henryki Danuty Stryczewskiej  
Andrzeja Wac-Włodarczyka

Lublin 2009

---

## **Autorzy:**

Jarosław Diatczyk – 5, 6, 7, Tomasz Giżewski – 9.2, Ryszard Goleman - 9.2, Mariusz Holuk – 10.4, Tadeusz Janowski – 1, 3.2, 10.4, Włodzimierz Janowski – 6, 10. 2, Leszek Jaroszynski - 7, Andrzej Kaczor – 8.3, Grzegorz Komarzyniec – 5, 6, 7, 10.2, Beata Kondratowicz-Kucewicz – 4.1, Janusz Kozak – 3.3, 4.2, Sławomir Kozak – 4.1, Michał Łanczont – 3.2, Michał Majka, - 3.3, Paweł Mazurek – 8.2, Joanna Michałowska-Samonek – 9.3, Krzysztof Nalewaj – 10.2, 10.3, Radosław Samoń – 10.3, Henryka Danuta Stryczewska – 5, 6, 7, 10.2, 10.3, Andrzej Wac-Włodarczyk – 8.1, 9.2, 9.3, Grzegorz Wojtasiewicz – 2, 4.2, 10.4.

## **Opiniodawcy:**

Antoni Cieśla  
Jan Sikora

## **Projekt okładki:**

Grzegorz Komarzyniec

## **Skład komputerowy:**

Beata Kondratowicz-Kucewicz

Wydanie publikacji dofinansowane przez Ministra Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego

ISBN: 978-83-61391-76-9

Wydano nakładem Lubelskiego Towarzystwa Naukowego

# SPIS TREŚCI

## PRZEDMOWA

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. AKTUALNY STAN ZASTOSOWAŃ NADPRZEWODNIKÓW</b>                              | <b>1</b>  |
| 1.1. Wprowadzenie do zagadnień nadprzewodnictwa                                 | 1         |
| 1.2. Materiały nawojowe z nadprzewodników                                       | 2         |
| 1.2.1. Przewody LTS – Nb-Ti, Nb <sub>3</sub> Sn                                 | 3         |
| 1.2.2. Przewody HTS – Bi-2212, Bi-2223, Y-123                                   | 5         |
| 1.3. Budowa urządzeń nadprzewodnikowych                                         | 7         |
| 1.3.1. Chłodzenie urządzeń nadprzewodnikowych                                   | 7         |
| 1.3.2. Krioprzepusty prądowe                                                    | 8         |
| 1.4. Wybrane zastosowania nadprzewodników                                       | 9         |
| 1.4.1. Elektromagnesy nadprzewodnikowe                                          | 9         |
| 1.4.2. Maszyny elektryczne                                                      | 12        |
| 1.4.3. Generatory nadprzewodnikowe                                              | 13        |
| 1.4.4. Nadprzewodnikowe silniki elektryczne                                     | 15        |
| 1.4.5. Silniki i generatory HTS dla jednostek pływających                       | 16        |
| 1.4.6. Generatory szybkoobrotowe i silniki wolnoobrotowych HTS o mocy 36MW      | 19        |
| 1.4.7. Kable nadprzewodnikowe                                                   | 22        |
| 1.4.8. Nadprzewodnikowe zasobniki energii (SMES)                                | 23        |
| 1.4.9. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu FCL                                  | 25        |
| 1.4.10. Nadprzewodnikowe transformatory                                         | 26        |
| 1.5. Literatura                                                                 | 28        |
| <b>2. UKŁADY CHŁODZENIA URZĄDZEŃ NADPRZEWODNIKOWYCH</b>                         | <b>30</b> |
| 2.1. Wprowadzenie                                                               | 30        |
| 2.2. Układy chłodzenia kriogenicznego                                           | 30        |
| 2.2.1. Chłodzenie techniką w kąpeli kriogenicznej                               | 31        |
| 2.2.2. Chłodzenie w układzie zamkniętym parami cieczy kriogenicznych            | 32        |
| 2.3. Chłodziarki mechaniczne.                                                   | 33        |
| 2.3.1. Kriołodziarki mechaniczne działające wg cyklu pracy Stirlinga.           | 35        |
| 2.3.2. Kriołodziarki mechaniczne działające wg cyklu pracy Gifforda – McMahona. | 38        |
| 2.3.3. Podsumowanie wiadomości o kriołodziarkach mechanicznych.                 | 44        |
| 2.4. Rury pulsacyjne – „pulse tube”.                                            | 45        |
| 2.5. Chłodzenie urządzeń nadprzewodnikowych techniką w kąpeli ze wspomaganiem.  | 47        |
| 2.6. Chłodzenie urządzeń nadprzewodnikowych techniką wymuszoną.                 | 48        |
| 2.7. Kriostaty urządzeń nadprzewodnikowych.                                     | 48        |
| 2.7.1. Izolacja termiczna kriostatów urządzeń nadprzewodnikowych                | 53        |
| 2.8. Podsumowanie.                                                              | 54        |
| 2.9. Literatura                                                                 | 54        |

|           |                                                                                          |           |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.</b> | <b>URZĄDZENIA NADPRZEWODNIKOWE<br/>W ELEKTROENERGETYCE</b>                               | <b>55</b> |
| 3.1.      | Wprowadzenie                                                                             | 55        |
| 3.2.      | Analiza działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu                                 | 56        |
| 3.2.1.    | Stany pracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu                                       | 56        |
| 3.2.2.    | Schematy zastępcze nadprzewodnikowych ograniczników prądu                                | 58        |
| 3.2.3.    | Schematy zastępcze rezystancyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu                 | 60        |
| 3.2.4.    | Schematy zastępcze indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu                    | 62        |
| 3.2.4.1.  | Stan wyczekiwania                                                                        | 63        |
| 3.2.4.2.  | Stan przejściowy I                                                                       | 64        |
| 3.2.4.3.  | Stan awaryjnego ograniczania prądu zwarcia                                               | 65        |
| 3.2.4.4.  | Stan przejściowy II                                                                      | 66        |
| 3.2.5.    | Schematy zastępcze trójfazowego ogranicznika prądu z dwoma elementami nadprzewodnikowymi | 67        |
| 3.2.5.1.  | Stan wyczekiwania                                                                        | 67        |
| 3.2.5.2.  | Stan przejściowy I                                                                       | 69        |
| 3.2.5.3.  | Stan awaryjnego ograniczania prądu zwarcia                                               | 71        |
| 3.2.5.4.  | Stan przejściowy II                                                                      | 72        |
| 3.2.6.    | Numeryczna symulacja pracy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu                         | 73        |
| 3.2.7.    | Wnioski                                                                                  | 74        |
| 3.3.      | Nadprzewodnikowy zasobnik energii                                                        | 75        |
| 3.3.1.    | Wstęp                                                                                    | 75        |
| 3.3.2.    | Energia w elektromagnesie nadprzewodnikowym SMES                                         | 75        |
| 3.3.3.    | Elektromagnes nadprzewodnikowy                                                           | 78        |
| 3.3.4.    | Chłodzenie elektromagnesu nadprzewodnikowego                                             | 84        |
| 3.3.5.    | Przepusty nadprzewodnikowe                                                               | 85        |
| 3.3.6.    | System pomiarowy                                                                         | 86        |
| 3.3.7.    | Wyniki eksperymentalne                                                                   | 87        |
| 3.3.8.    | Podsumowanie                                                                             | 89        |
| 3.4.      | Literatura                                                                               | 89        |
| <b>4.</b> | <b>ELEKTROMAGNESY NADPRZEWODNIKOWE</b>                                                   | <b>91</b> |
| 4.1.      | Elektromagnesy dla separatorów magnetycznych                                             | 91        |
| 4.1.1.    | Wprowadzenie                                                                             | 91        |
| 4.1.2.    | Własności magnetyczne materiałów                                                         | 92        |
| 4.1.3.    | Działanie i klasyfikacja separatorów magnetycznych                                       | 93        |
| 4.1.4.    | Separator odchylający typu OGMS                                                          | 97        |
| 4.1.5.    | Elektromagnesy nadprzewodnikowe dla separatorów OGMS                                     | 99        |
| 4.1.5.1.  | Etapy projektowania elektromagnesu nadprzewodnikowego dla separatora OGMS                | 101       |
| 4.1.5.2.  | Zakłócenia                                                                               | 101       |
| 4.1.5.3.  | System chłodzenia                                                                        | 101       |



|               |                                                                                                             |            |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.5.4.      | Dobór przewodu nadprzewodnikowego                                                                           | 102        |
| 4.1.5.5.      | Zagadnienia mechaniczne                                                                                     | 103        |
| <b>4.1.6.</b> | <b>Proces separacji magnetycznej w separatorze typu OGMS</b>                                                | <b>105</b> |
| 4.1.6.1.      | Dobór parametrów uzwojeń elektromagnesu separatora OGMS pod kątem przebiegu procesu separacji magnetycznej. | 109        |
| <b>4.1.7.</b> | <b>Przemysłowe instalacje separatorów magnetycznych</b>                                                     | <b>110</b> |
| <b>4.1.8.</b> | <b>Podsumowanie</b>                                                                                         | <b>113</b> |
| <b>4.2.</b>   | <b>Elektromagnesy nadprzewodnikowe akceleratorów cząstek elementarnych</b>                                  | <b>114</b> |
| 4.2.1.        | Wprowadzenie                                                                                                | 114        |
| 4.2.2.        | Zastosowanie nadprzewodników w CERNie                                                                       | 115        |
| 4.2.3.        | LHC – Large Hadron Collider                                                                                 | 117        |
| 4.2.4.        | Elektromagnesy dla LHC                                                                                      | 119        |
| 4.2.5.        | Budowa uzwojeń nadprzewodnikowych dla dipoli                                                                | 120        |
| 4.2.6.        | Zasilanie magnesów nadprzewodnikowych LHC – przepusty prądowe                                               | 123        |
| 4.2.7.        | Chłodzenia magnesów nadprzewodnikowych LHC                                                                  | 125        |
| 4.2.8.        | Testy elektromagnesów dla LHC                                                                               | 127        |
| 4.2.9.        | Instalacja elektromagnesów w tunelu                                                                         | 129        |
| 4.2.10.       | Detekcja cząstek elementarnych –detektory i akceleratory w CERN-ie                                          | 131        |
| 4.2.11.       | Magnesy nadprzewodnikowe dla ATLAS-a i CMS-a                                                                | 132        |
| 4.2.12.       | Eksperyment CAST                                                                                            | 136        |
| 4.2.13.       | Podsumowanie                                                                                                | 137        |
| <b>4.3.</b>   | <b>Literatura</b>                                                                                           | <b>137</b> |
| <b>5.</b>     | <b>PLAZMA NIETERMICZNA – WARUNKI GENERACJI, WYBRANE ZASTOSOWANIA</b>                                        | <b>138</b> |
| 5.1.          | Wstęp                                                                                                       | 138        |
| 5.2.          | Właściwości i podział plazmy                                                                                | 138        |
| 5.3.          | Plazma nietermiczna – warunki generacji i zastosowania                                                      | 142        |
| 5.4.          | Wyładowania elektryczne jako źródło plazmy                                                                  | 144        |
| 5.4.1.        | Wyładowania dielektryczne barierowe DBDs                                                                    | 145        |
| 5.4.2.        | Wyładowania łukowe                                                                                          | 146        |
| 5.5.          | Reaktory plazmy nietermicznej                                                                               | 148        |
| 5.5.1.        | Reaktory z wyładowaniami barierowymi – ozonatory                                                            | 149        |
| 5.5.2.        | Proces syntezy ozonu w wyładowaniach barierowych                                                            | 150        |
| 5.5.3.        | Reaktor z wyładowaniami barierowymi jako odbiornik energii elektrycznej                                     | 151        |
| 5.5.4.        | Elektryczne i energetyczne parametry reaktorów z wyładowaniami barierowymi                                  | 152        |
| 5.5.5.        | Zastosowanie nietermicznej plazmy w procesach sterylizacji gleby                                            | 156        |
| 5.6.          | Podsumowanie                                                                                                | 169        |
| 5.7.          | Literatura                                                                                                  | 170        |

|           |                                                                                  |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6.</b> | <b>UKŁADY ZASILANIA REAKTORÓW PLAZMOWYCH</b>                                     | <b>173</b> |
| 6.1.      | Wstęp                                                                            | 173        |
| 6.2.      | Reaktory ze ślizgającym się łukiem elektrycznym                                  | 176        |
| 6.3.      | Charakterystyki reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym                | 179        |
| 6.4.      | Cykl pracy reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym                      | 185        |
| 6.5.      | Przegląd wybranych rozwiązań układów zasilania reaktorów nietermicznej plazmy    | 190        |
| 6.5.1.    | Układy transformatorowe                                                          | 191        |
| 6.5.2.    | Zintegrowany układ zasilania                                                     | 192        |
| 6.5.3.    | Transformator pięciokolumnowy w układzie zasilania reaktorów łukowych            | 197        |
| 6.5.4.    | Układy przekształtnikowe                                                         | 201        |
| 6.6.      | Podsumowanie                                                                     | 204        |
| 6.7.      | Literatura                                                                       | 205        |
| <b>7.</b> | <b>MODELOWANIE REAKTORÓW ZE ŚLIZGAJĄCYM SIĘ WYŁADOWANIEM ŁUKOWYM</b>             | <b>207</b> |
| 7. 1.     | Wstęp                                                                            | 207        |
| 7.2.      | Przegląd modeli matematycznych wyładowań łukowych                                | 208        |
| 7.3.      | Modelowanie ślizgającego się wyładowania łukowego                                | 209        |
| 7.2.1.    | Uproszczony model matematyczny do wyznaczenia krytycznej długości łuku           | 219        |
| 7.2.2.    | Symulacja rozkładu temperatury w komorze wyładowczej                             | 225        |
| 7.3.      | Wyniki badań eksperymentalnych                                                   | 227        |
| 7.3.1.    | Moc ślizgającego się wyładowania.                                                | 227        |
| 7.3.2.    | Wyniki diagnostyki spektroskopowej                                               | 232        |
| 7.3.3.    | Wyniki diagnostyki termowizyjnej                                                 | 235        |
| 7.4.      | Podsumowanie                                                                     | 237        |
| 7.5.      | Literatura                                                                       | 239        |
| <b>8.</b> | <b>BADANIA KOMPATYBILNOŚCI URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH</b>                    | <b>240</b> |
| 8.1.      | Wstęp                                                                            | 240        |
| 8.2.      | Pomiary laboratoryjne kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektrycznych | 240        |
| 8.2.1.    | Pojęcia wstępne                                                                  | 240        |
| 8.2.2.    | Zagadnienie prawne                                                               | 241        |
| 8.2.3.    | Badania i analizy kompatybilności elektromagnetycznej                            | 242        |
| 8.2.8.1.  | Metody badań emisyjności promieniowanej urządzeń                                 | 244        |
| 8.2.3.2.  | Metody badań emisyjności przewodzonej urządzeń                                   | 248        |
| 8.2.3.3.  | Metody badań harmonicznych w układzie zasilania urządzeń                         | 251        |
| 8.2.3.4.  | Metody badań odporności urządzeń elektrycznych                                   | 252        |
| 8.2.4.    | Wnioski                                                                          | 254        |

|                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8.3. Wymagania w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej dla wyrobów elektrycznych</b> | <b>255</b> |
| 8.3.1. Akty prawne regulujące kompatybilność elektromagnetyczną                                | 255        |
| 8.3.2. Wymagania zasadnicze EMC                                                                | 256        |
| 8.3.3. Procedury oceny zgodności wyrobów                                                       | 256        |
| 8.3.4. Dokumentacja związana z oceną zgodności oraz oznakowanie CE                             | 258        |
| 8.3.4.1. Dokumentacja techniczna aparatury                                                     | 259        |
| 8.3.4.2. Dokumentacja techniczna instalacji stacjonarnej                                       | 259        |
| 8.3.4.3. Deklaracja zgodności                                                                  | 260        |
| 8.3.4.4. Oznakowanie CE                                                                        | 260        |
| 8.3.4.5. Instrukcja obsługi                                                                    | 261        |
| 8.3.5. Ekspozowanie aparatury na targach, pokazach i wystawach                                 | 261        |
| 8.3.6. Kontrola wyrobów w zakresie EMC                                                         | 262        |
| 8.3.7. Najczęściej popełniane błędy w ocenie zgodności EMC                                     | 263        |
| 8.4. Podsumowanie                                                                              | 265        |
| 8.5. Literatura                                                                                | 266        |
| <b>9. WYBRANE METODY OBLICZENIOWE I POMIAROWE URZĄDZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH</b>                | <b>269</b> |
| 9.1. Wstęp                                                                                     | 269        |
| 9.2. Systemy cyfrowej analizy sygnałów z pomiarów magnetycznych                                | 269        |
| 9.2.1. Wprowadzenie                                                                            | 269        |
| 9.2.2. Permeometr jarzmowy Hopkinsona                                                          | 270        |
| 9.2.3. Badania defektoskopowe                                                                  | 279        |
| 9.2.4. Wnioski                                                                                 | 283        |
| 9.3. Mikrofalowe obrazowanie raka piersi przy użyciu metody FDT                                | 284        |
| 9.3.1. Wprowadzenie                                                                            | 284        |
| 9.3.2. Metody diagnostyki medycznej                                                            | 285        |
| 9.3.3. Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. Finite Difference Time Domain)       | 286        |
| 9.3.3.1. Stabilność numeryczna metody                                                          | 289        |
| 9.3.3.2. Dyspersja numeryczna                                                                  | 289        |
| 9.3.3.3. Absorpcyjny warunek brzegowy                                                          | 290        |
| 9.3.4. Tomografia mikrofalowa                                                                  | 291        |
| 9.3.5. Obrazowanie mikrofalowe                                                                 | 293        |
| 9.3.6. Algorytm ogniskujący                                                                    | 294        |
| 9.3.7. Wnioski                                                                                 | 295        |
| 9.4. Podsumowanie                                                                              | 295        |
| 9.5. Literatura                                                                                | 296        |

|            |                                                                       |            |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>10.</b> | <b>WYBRANE ZAGADNIENIA ENERGETYKI<br/>ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII</b> | <b>299</b> |
| 10.1.      | Wstęp                                                                 | 299        |
| 10.2.      | Instalacja ozonowania wody zasilana z ogniw fotowoltaicznych          | 300        |
| 10.2.1.    | System fotowoltaiczny                                                 | 300        |
| 10.2.2.    | Wytwarzanie ozonu                                                     | 301        |
| 10.2.3.    | System ozonowania wody                                                | 304        |
| 10.2.4.    | Zasilanie w energię elektryczną                                       | 305        |
| 10.2.5.    | Rozpływ energii                                                       | 307        |
| 10.3.      | Ogrzewanie budynków układami zintegrowanymi<br>z ogniwami paliwowymi  | 307        |
| 10.3.1.    | Budowa i zasada działania ogniwa paliwowego                           | 308        |
| 10.3.2.    | Klasyfikacja i parametry ogniw paliwowych                             | 309        |
| 10.3.3.    | Wpływ zastosowania ogniw paliwowych na środowisko<br>naturalne        | 310        |
| 10.3.4.    | Generatory CHP z ogniwami paliwowymi                                  | 311        |
| 10.3.4.1.  | Generatory CHP z ogniwami typu PEMFC                                  | 312        |
| 10.3.4.2.  | Generatory CHP z ogniwami typu SOFC                                   | 312        |
| 10.3.4.3.  | Porównanie generatora CHP współpracującego<br>z kotłem kondensacyjnym | 313        |
| 10.3.4.4.  | Obwód ciepłej wody z generatorem CHP                                  | 314        |
| 10.3.5.    | Układy hybrydowe z ogniwami typu SOFC                                 | 315        |
| 10.3.6.    | Inne zastosowania ogniw paliwowych                                    | 317        |
| 10.3.7.    | Zalety i wady ogniw paliwowych                                        | 318        |
| 10.4.      | Mikroelektrociepłownie domowe                                         | 318        |
| 10.4.1.    | Wprowadzenie                                                          | 318        |
| 10.4.1.1.  | Definicja Micro-CHP                                                   | 321        |
| 10.4.1.2.  | Technologia Micro-CHP                                                 | 323        |
| 10.4.1.3.  | Efektywność obecnie oferowanych systemów CHP                          | 326        |
| 10.4.2.    | Rozwiązania Micro-CHP dla gospodarstw domowych                        | 327        |
| 10.4.3.    | Przegląd układów Micro-CHP oferowanych komercyjnie                    | 330        |
| 10.4.3.1.  | Zastosowanie ze względu na budowę układu                              | 330        |
| 10.5.      | Podsumowanie                                                          | 332        |
| 10.6.      | Literatura                                                            | 333        |

## PRZEDMOWA

Udoskonalenie technologii wytwarzania nadprzewodników niskotemperaturowych drugiego rodzaju i nadprzewodników wysokotemperaturowych o dobrych parametrach w silnych polach magnetycznych, stworzyło warunki do wykorzystania ich w elektroenergetyce.

W urządzeniach silnoprądowych stosowane są od lat sześćdziesiątych nadprzewodniki II rodzaju, takie jak związki międzymetaliczne  $Nb_3Sn$ ,  $Nb_3Ge$  i stopy Nb-Ti, Nb-Zr, których temperatura krytyczna nie przekracza 25 K, umownej granicy nadprzewodnictwa niskotemperaturowego. Temperatury takie zapewnia chłodzenie ciekłym helem o temperaturze wrzenia 4,2 K lub gazowym chłodzonym kontaktowo. W szczególności stop Nb-Ti i związek międzymetaliczny  $Nb_3Sn$  są podstawowymi materiałami do wytwarzania przewodów w postaci wiązek włókien nadprzewodnikowych o średnicach kilku mikrometrów, umieszczonych w matrycy miedzianej lub aluminiowej pełniącej rolę stabilizatora. Włókna w wiązce są dodatkowo skręcane w celu zmniejszenia strat sprzężenia od pola zewnętrznego i własnego. Przewody te mogą pracować w silnych polach magnetycznych dochodzących do 20 T, przy uzyskiwanych gęstościach prądu w materiale nadprzewodnika rzędu  $10^9$  A/m<sup>2</sup>.

Badania nad zastosowaniem nadprzewodników, w szczególności do procesów separacji magnetycznej, są prowadzone od kilkunastu lat w Lublinie we współpracy Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki w Warszawie i Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej. Stanowisko laboratoryjne wyposażone w chłodziarkę kontaktową SRDK - 408 firmy SUMITOMO umożliwia prowadzenie badań w temperaturach od 4 do 300 kelwinów.

Wraz z rozwojem technologii wytwarzania nadprzewodników wysokotemperaturowych, których temperatura krytyczna przekracza temperaturę wrzenia azotu (77 K), stosowanego do ich chłodzenia, powstała możliwość szerszego wykorzystania nadprzewodników, dzięki radykalnemu zmniejszeniu kosztów układu chłodzenia. Obecnie najbardziej realne do zastosowań silnoprądowych staje się wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych Bi-2223 ( $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ ), YBCO ( $YBa_2Cu_3O_x$ ) oraz odkrytego w 2001 roku dwuborku magnezu  $MgB_2$ .

Szczególne właściwości nadprzewodników umożliwiają budowę urządzeń elektrycznych o parametrach nieosiągalnych przy stosowaniu materiałów konwencjonalnych. Nadprzewodniki wykazują całkowity zanik rezystywności jedynie w warunkach, gdy ich parametry, tj. temperatura, gęstość prądu i gęstość strumienia magnetycznego nie przekraczają pewnych

wartości nazywanych krytycznymi. Przekroczenie wartości krytycznej któregośkolwiek parametru powoduje gwałtowne przejście ze stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego. Właściwość gwałtownego (skokowego) wzrostu rezystancji elementu nadprzewodnikowego przy przekroczeniu jego wartości krytycznej prądu umożliwia budowę ograniczników prądów zwarciovych w sieciach elektroenergetycznych.

Zwarcia awaryjne w sieciach elektroenergetycznych są dużym zagrożeniem dla transformatorów, generatorów, szyn zbiorczych i linii przesyłowych oraz zmniejszają pewność dostarczania energii odbiorcom. Ograniczanie prądów zwarcia za pomocą dławików i odpowiednio dużej reaktancji transformatorów znacznie wpływa na wzrost kosztów budowy i eksploatacji systemu elektroenergetycznego, a więc i na cenę energii elektrycznej.

O dynamicznych skutkach sił powstających w urządzeniach elektroenergetycznych decyduje największa wartość chwilowa prądu zwarciovego (prąd dynamiczny) przepływającego przez nie podczas zwarcia. Maksymalna wartość sił mechanicznych od prądu zwarcia występuje zwykle w czasie, gdy prąd osiąga pierwsze maksimum po zwarcu tj. 0,005 sekundy przy 50 Hz. Jeżeli przerwiemy obwód zwarciovym lub powiększymy jego impedancję bardzo szybko tj. w czasie znacznie krótszym od 0,005 sekundy to siła dynamiczna nie osiągnie swojego pierwszego maksimum i nie wytworzy nadmiernych naprężeń i uszkodzeń urządzeń elektromagnetycznych w zwartym obwodzie.

Tak szybkie działanie dla dużych prądów zapewniają konwencjonalne ograniczniki prądu o dwóch równoległych torach prądowych. Tor na prąd roboczy wyposażony w mikro-ładunek wybuchowy, którego zadziałaniem steruje urządzenie mierzące szybkość narastania prądu ( $di/dt$ ), wysyła sygnał detonacji ładunku w obwodzie roboczym. Zgaszenie łuku zapewnia bocznikujący tor roboczy bezpiecznik; czas przerywania obwodu nie przekracza 1 ms. Wadą tych ograniczników jest konieczność wymiany wkładek po każdorazowym zadziałaniu oraz duża zawodność (błędne zadziałanie) szczególnie, gdy obciążenie jest charakteru pojemnościowego. Poprawa ich niezawodności jest skomplikowana i kosztowna.

Szybkie i niezawodne działanie mogą zapewnić nadprzewodnikowe ograniczniki prądów, bowiem czas przejścia nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego wynosi kilkadziesiąt mikro sekund, a ich powrót do pracy po zadziałaniu jest natychmiastowy i nie wymaga wykonywania jakichkolwiek czynności.

Idea budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądowych powstała ponad 20 lat temu, jednak warunki do jej realizacji powstały przed kilku laty, kiedy to wytworzono wysokotemperaturowe elementy nadprzewodnikowe oraz kontaktowe układy chłodzenia (z ang.: cryocooler). W kilku laboratoriach na

świecie prowadzone są intensywne badania i powstają pierwsze oferty dostawy nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

Wśród najbardziej zaawansowanych technologicznie i aplikacyjnie silnoprządowych urządzeń nadprzewodnikowych znajdują się nadprzewodnikowe ograniczniki prądu oraz nadprzewodnikowe zasobniki energii. Mimo, iż prowadzone prace badawcze i projektowe wskazują na obiecujące perspektywy zastosowań obu typów urządzeń nadprzewodnikowych, to w chwili obecnej jedynie nadprzewodnikowe zasobniki energii (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage) osiągnęły etap jeszcze ograniczonego, ale komercyjnego zastosowania w sieciach elektroenergetycznych. Przemysłowa produkcja zasobników nadprzewodnikowych odbywa się na razie jedynie w Stanach Zjednoczonych, natomiast w laboratoriach zachodniej Europy, Japonii, Rosji, Korei i Chin prowadzone są intensywne prace badawcze i projektowe, w ramach których budowane są coraz liczniejsze urządzenia eksperymentalne. Niezbyt zaawansowany poziom technologii nadprzewodnikowych w pozostałych krajach, w tym także w Polsce, wynika zapewne z niedoceniań możliwości ich praktycznych zastosowań, braku wystarczającego finansowania badań, jak też z niewielkiego upowszechnienia wiedzy o tych unikalnych, ale obiecujących urządzeniach.

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

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

Badania nad układami zasilania reaktorów plazmowych kontynuowano we współpracy z Uniwersytetem w Orleanie, we Francji, w którym powstała idea

reaktora z wyładowaniami zwanymi w literaturze anglojęzycznej „gliding arc”, a któremu ich twórcy nadali technologiczną nazwę „GlidArc”. Ślizgające się wyładowania łukowe jako technologiczne źródło nietermicznej plazmy wykorzystywane są głównie do oczyszczania gazów wylotowych elektrowni z zawartych w nich związków siarki, azotu i węgla oraz do neutralizacji lotnych substancji organicznych (z ang. VOC – volatile organic compounds). Główną ich zaletą jest możliwość wytwarzania zimnej nierównowagowej plazmy bezpośrednio w zanieczyszczonym gazie przy ciśnieniu atmosferycznym, a zatem w takich warunkach, w jakich emitowane są do atmosfery gazy wylotowe elektrowni opalanych węglem kamiennym i innymi paliwami kopalnymi. Współpraca z uniwersytetem w Orleanie, zaowocowała opracowaniem idei transformatorowych układów zasilania reaktorów ze ślizgającymi się wyładowaniami łukowymi, zwanych zintegrowanymi, które zostały opatentowane i stały się podstawą do budowy kilkunastu zasilaczy, pracujących obecnie w laboratoriach w Polsce, m.in. w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej, w Instytucie Chemii Przemysłowej w Warszawie, Przemysłowym Instytucie Elektroniki oraz we Francji. W ostatnim okresie powstała koncepcja, zrealizowana w ramach rozprawy doktorskiej, budowy zasilacza reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym bazującego na rdzeniu pięciokolumnowym zwijanym. Zasilacz został zbudowany i poddany badaniom eksperymentalnym, które potwierdziły słuszość zaproponowanej idei. Zasilacz spełnia wymagania reaktora plazmowego w zakresie zapłonu wyładowań i cyklicznej pracy reaktora po zapłonie i posiada dobre właściwości regulacyjne i eksploatacyjne.

Aktualnie, badania w zakresie technologii nietermicznej plazmy i jej zastosowań są kontynuowane i obejmują także modelowanie zjawisk w reaktorach nietermicznej plazmy, badania rozkładu temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego za pomocą metod spektroskopowych i termowizyjnych, wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych do zasilania urządzeń wyładowczych oraz wykorzystanie nietermicznej plazmy generowanej wyładowaniami barierowymi w procesach sterylizacji.

Wiele prac badawczych prowadzonych w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii poświęcono tematyce zjawisk występujących w ferromagnetykach. Dotyczą one zarówno teorii w zakresie badań podstawowych i poznawczych, jak również pomiarów laboratoryjnych określających właściwości i aplikacje układów zawierających elementy magnetyczne. Pierwsze prace obejmowały problematykę magnetycznych mnożników częstotliwości z ich najbardziej reprezentatywną klasą tj. potrajaczy, pięciokrotników i dziesięciokrotników częstotliwości. Badano również hybrydowe mnożniki częstotliwości posiadające w swej strukturze



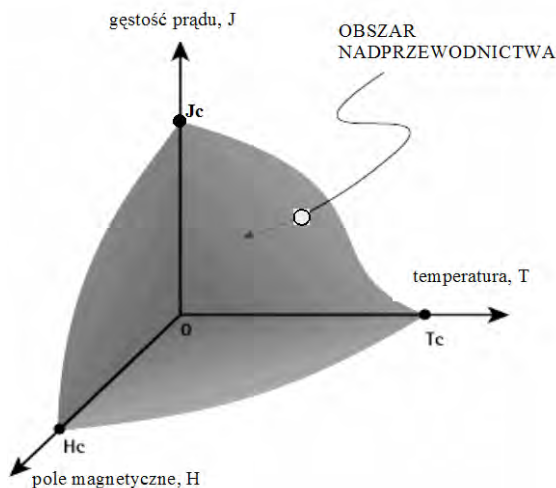
oprócz wymienionych członów magnetycznych, elektroniczne bloki półprzewodnikowe. Urządzenia te znajdowały zastosowanie przede wszystkim w metalurgii do zasilania indukcyjnych układów grzejnych, w szybkoobrotowych zespołach napędowych oraz w układach zasilania wielu urządzeń elektrotechnologicznych. Przedmiotem intensywnych badań stały się nowoczesne materiały magnetycznie miękkie. Stworzono modele obliczeniowe oraz układy laboratoryjne pozwalające na określenie i weryfikację pomiarową parametrów tych materiałów a także zbudowanych z nich rdzeni. Analizie poddano głównie materiały amorficzne, nanokrystaliczne i ferryty. Badano możliwości ich zastosowania w magnetycznych mnożnikach częstotliwości, transformatorach, wyłącznikach ochronnych, dławikach przeciwzakłóceńowych, przetwornicach napięcia w sprzęcie lotniczym i ogólnie w podzespołach elektronicznych. Opracowano nowe modele obwodów magnetycznych uwzględniających pętlę histerezy z udziałem metody Preisach'a i algorytmów sztucznych sieci neuronowych. Prace pomiarowe odbywają się w nowopowstałym Laboratorium Pomiarów Magnetycznych. Odrębną problematykę stanowi badanie wpływu pól elektromagnetycznych na organizmy żywe, a wśród nich zagadnienia obrazowania i diagnostyki medycznej. Innym rodzajem tematyki uprawianej w Instytucie związanej z ferromagnetyzmem jest kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). W szczególności przeprowadzono badania nad doбором rdzeni magnetycznych dławików z kompensacją prądową jako ograniczników przeciwzakłóceńowych oraz opracowano układ pomiarowo-symulacyjny do oceny skuteczności filtrowania przewodzonych zakłóceń elektromagnetycznych. Obecnie trwają prace przygotowawcze do badań przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych w reaktorach plazmowych. Instytut dysponuje własną komorą izolowaną elektromagnetycznie i akustycznie oraz zestawem niezbędnych przyrządów pomiarowych wykorzystywanych do badań naukowych z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej.

**Redaktorzy**

# 1. AKTUALNY STAN ZASTOSOWAŃ NADPRZEWODNIKÓW

## 1.1. Wprowadzenie do zagadnień nadprzewodnictwa

Nadprzewodnictwem nazywamy połączenie właściwości magnetycznych i elektrycznych materiału objawiających się zanikiem rezystancji elektrycznej w określonych warunkach. Materiały nadprzewodnikowe znajdują się w stanie nadprzewodzącym, gdy punkt ich pracy wyznaczony przez temperaturę, gęstość prądu oraz natężenie pola magnetycznego leży poniżej charakterystycznej dla danego materiału powierzchni krytycznej.



Rys. 1.1. Powierzchnia krytyczna nadprzewodnika [1]

Charakterystyka krytyczna nadprzewodnika jest to zależność natężenia krytycznego pola magnetycznego od gęstości prądu (albo gęstości prądu krytycznego od natężenia pola magnetycznego) w określonej temperaturze poniżej temperatury krytycznej.

Ze względu na charakter zmian właściwości w polu magnetycznym wprowadzony został podział na nadprzewodniki I i II rodzaju, a ze względu na wartość temperatury krytycznej podział na nadprzewodniki niskotemperaturowe (LTS) oraz wysokotemperaturowe (HTS). Umowną granicą rozdzielającą nadprzewodniki niskotemperaturowe od wysokotemperaturowych jest temperatura  $T_c = 25$  K, wynikająca z teorii mikroskopowej BCS [1].

W rzeczywistym nadprzewodniku przejście z jednego stanu do drugiego jest bardzo ostre, ale nie skokowe. Przyjmuje się, że parametr osiąga wartość krytyczną, gdy prąd krytyczny nadprzewodnika lub pole elektryczne w nadprzewodniku osiąga wartość przyjętego kryterium.

Dla nadprzewodników niskotemperaturowych stosowane są kryteria

rezystancyjne  $10^{-14} \Omega\text{m}$  i  $10^{-13} \Omega\text{m}$  lub kryteria polowe  $10 \mu\text{V/m}$  i  $100 \mu\text{V/m}$ . Dla nadprzewodników wysokotemperaturowych stosowane są kryteria rezystancyjne  $2 \cdot 10^{-13} \Omega\text{m}$  i  $10^{-12} \Omega\text{m}$  lub kryteria polowe  $100 \mu\text{V/m}$  i  $500 \mu\text{V/m}$ .

Tablica 1.1. Definicje parametrów krytycznych nadprzewodników [2]

| nazwa i symbol                              |          | definicja                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| temperatura krytyczna                       | $T_c$    | temperatura, poniżej której nadprzewodnik wykazuje nadprzewodnictwo przy zerowym natężeniu pola magnetycznego i przy zerowym prądzie elektrycznym                                |
| natężenie dolnego krytycznego pola magn.[3] | $H_{c1}$ | natężenie pola magnetycznego, przy którym flukson wnika po raz pierwszy do objętości nadprzewodników II rodzaju powodując odstępstwo od idealnego diamagnetyzmu                  |
| natężenie górnego krytycznego pola mag      | $H_{c2}$ | maksymalne natężenie pola magnetycznego, poniżej którego nadprzewodnik II rodzaju jest w stanie mieszanym                                                                        |
| prąd krytyczny                              | $I_c$    | maksymalny prąd stały, który może być rozpatrywany jako płynący bez rezystancji                                                                                                  |
| gęstość prądu krytycznego                   | $J_c$    | gęstość prądu elektrycznego przy prądzie krytycznym określona albo dla całego przekroju przewodu (całkowita), albo gdy występuje stabilizator, niestabilizowanej części przewodu |

## 1.2. Materiały nawojowe z nadprzewodników

Większość metali wykazujących nadprzewodnictwo to niskotemperaturowe nadprzewodniki I rodzaju. Wyjątki to niob i wanad. Nadprzewodniki I rodzaju nie mają zastosowania w uzwojeniach nadprzewodnikowych z powodu małych gęstości prądu krytycznego. Nadprzewodnikami II rodzaju są zarówno nadprzewodniki niskotemperaturowe: metale niob i wanad, niektóre stopy np. Nb-Ti, Nb-Zr, pewne związki międzymetaliczne grupy A15 takie jak np.  $\text{V}_3\text{Ga}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Al}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Ga}$ ,  $\text{Nb}_3(\text{Al,Ga})$ ,  $\text{Nb}_3\text{Ge}$ , jak i wysokotemperaturowe materiały ceramiczne takie jak np. Bi-2223, Bi-2212, Y-123 [1].

Do budowy przewodów nadprzewodnikowych znalazły zastosowanie nadprzewodniki II rodzaju. Ze względu na konieczność zapewnienia stabilnej pracy i zminimalizowania strat ciepłych przewody nadprzewodnikowe mają złożoną budowę. Nadprzewodnik jest podzielony na włókna o średnicach od ułamka do kilkudziesięciu mikrometrów, które są umieszczone w matrycy (stabilizatorze) z materiału o dobrej przewodności elektrycznej i cieplnej. Włókna są skręcane i transponowane w celu zmniejszenia strat od pola magnetycznego zewnętrznego i własnego. Materiałem matrycy może być miedź, aluminium lub srebro (w przypadku HTS). Stosowane są również bariery wysokorezystancyjne (np. z Cu-Ni) na włóknach i wiązkach w celu zmniejszenia strat ciepłych od prądów wirowych. Nadprzewodnik zajmuje więc tylko część całkowitego

przekroju przewodu. Skomplikowana budowa wewnętrznego przewodu nadprzewodnikowego ma zminimalizować straty w stanach przejściowych oraz straty przemienoprowadowe.

Przewód nadprzewodnikowy charakteryzują następujące parametry: charakterystyka krytyczna przewodu, średnica przewodu, liczba włókien nadprzewodnikowych oraz stosunek objętości matrycy do nadprzewodnika  $C_{sc}$  (współczynnik stabilizacji) [2].

Masowa produkcja nadprzewodników LTS rozpoczęła się w latach 60. Są to nadprzewodniki Nb-Ti oraz Nb<sub>3</sub>Sn, w postaci drutów o strukturze włóknistej i w matrycy metalowej (Cu, Cu-Sn) (rys.1.2). Po odkryciu nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego w 1986 roku rozpoczęto w latach 90 produkcję ceramicznych nadprzewodników I generacji (Bi-2212 i Bi-2223) w postaci przewodów o strukturze włóknistej lub kształtek masowych, oraz nadprzewodniki II generacji (YBCO) w postaci taśm (rys.1.3).

### 1.2.1. Przewody LTS – Nb-Ti, Nb<sub>3</sub>Sn

Najbardziej rozpowszechnionymi materiałami nadprzewodnikowymi wykorzystywanymi do produkcji przewodów są: stop Nb-Ti, związki międzymetaliczne Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Al i V<sub>3</sub>Ga oraz ceramiki Bi-2212, Bi-2223 i Y-123. Ostatnio (2004) pojawiły się na rynku również przewody z MgB<sub>2</sub>. Przewody z Nb-Ti stosowane są w elektromagnesach wytwarzających pola magnetyczne o indukcji do 8 T. Dla większych indukcji magnetycznych, do 14 T, stosowane są przewody z Nb<sub>3</sub>Sn. Dla pól od 13 T do 18 T stosowane są przewody wykonane z V<sub>3</sub>Ga. Dla pól powyżej 18 T dochodzących nawet do 30 T stosowane są przewody wykonane z Nb<sub>3</sub>Al i Nb<sub>3</sub>(Al,Ge) [1]. Wymienione przewody chłodzone są ciekłym helem. Przewody z Bi-2212, Bi-2223 i Y-123 stosowane są do budowy uzwojeń nadprzewodnikowych pracujących w temperaturze 77 K i niższej [2].

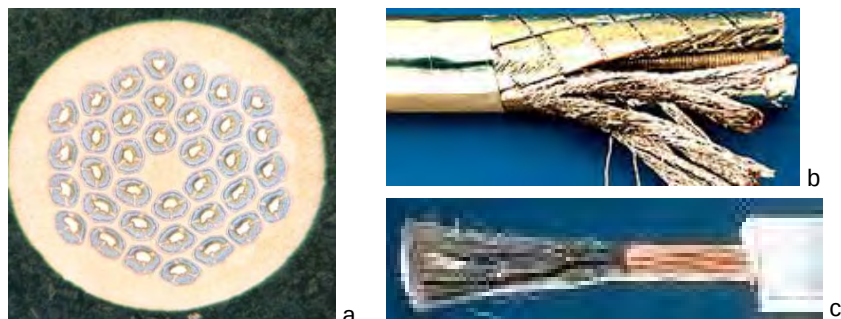
Parametry krytyczne nadprzewodników I rodzaju mają małe wartości, wobec czego nie są one stosowane w urządzeniach energetycznych. Znajdują one zastosowanie w bardzo czułych przyrządach pomiarowych słabych pól magnetycznych i napięć (rzędu 10<sup>-7</sup> V) takich jak nadprzewodnikowe interferometry kwantowe, kriotrony i wyłączniki elektromagnesów nadprzewodnikowych.

Nadprzewodniki II rodzaju są wykorzystywane przede wszystkim do wytwarzania przewodów nadprzewodnikowych, do zastosowań w elektromagnesach nadprzewodnikowych, w kriokablach oraz kriogenicznych maszynach wirujących. Najczęściej stosowane są stop – Nb-Ti oraz związek międzymetaliczny grupy A15 - Nb<sub>3</sub>Sn. Najwyższe wartości parametrów krytycznych osiągane są w związkach międzymetalicznych.

Ze względu na konieczność minimalizacji strat cieplnych oraz stabilną pracę przewody nadprzewodnikowe mają złożoną budowę. Składają się one z wiązek włókien nadprzewodnikowych o średnicach od ułamka do kilku mikrometrów. Włókna są umieszczone w stabilizatorze zwanym matrycą. Materiały stosowane na matryce to: Cu, CuNi, CuSn lub Al. Rolą matrycy jest poprawa właściwości mechanicznych i elektrycznych oraz zwiększenie

pojemności cieplnej całego przewodu. Włókna w wiązce są skręcane i transponowane w celu zmniejszenia strat od pola zewnętrznego i własnego.

Wykazujące nadprzewodnictwo stopy niobu z tytanem (Nb-Ti) i cyną (Nb<sub>3</sub>Sn) są od 1960 r. podstawowymi materiałami nadprzewodnikowymi z których wykonuje się uzwojenia elektromagnesów nadprzewodnikowych do generowania pola magnetycznego o indukcji 10 Tesli, a w szczególnych przypadkach nawet do 20 Tesli.



Rys. 1.2. Przewód o średnicy 0,78 mm z 6048 włóknami Nb<sub>3</sub>Sn (a); przewód NbTi z włóknami w matrycy miedzianej (b), (c) [2]

Oprócz stosowanych do wyrobów przewodów stopów Nb-Ti i Nb<sub>3</sub>Sn, szersze zastosowanie mają też przewody wykonane z nadprzewodników takich jak V<sub>3</sub>Ga i Nb<sub>3</sub>Al.

Wartość indukcji krytycznej przewodów wykonanych ze stopu Nb-Ti nie przekracza 8-10 T, natomiast stop Nb<sub>3</sub>Sn ze względu na wysoką wartość pola krytycznego równą 28 T (4,2 K) jest stosowany w uzwojeniach elektromagnesów wytwarzających pole o wartościach z zakresu 10-20 T.

W tabelicy 1.2 przedstawione są parametry wybranych przewodów Nb-Ti. Wartości współczynników  $C_{sc}$  tych przewodów zawarte są w przedziale od 1,4 do 15. Charakterystyki krytyczne przewodów z Nb<sub>3</sub>Sn zamieszczone są w tabelicy 1.3.

Tabela 1.2 Wybrane przewody kołowe i prostokątne z Nb-Ti Vacuumschmelzte [1,2]

| NbTi        | $C_{sc}$ | $\varnothing_{przewi}$ lub (szer. x grub.) | liczba włókien | $\varnothing_{wt}$ |
|-------------|----------|--------------------------------------------|----------------|--------------------|
|             |          | mm, lub (mm x mm)                          |                | $\mu m$            |
| F 60 (0,4)  | 1,90     | 0,40                                       | 60             | 30                 |
| T 54 (0,4)  | 1,35     | 0,40                                       | 54             | 36                 |
| F 24 (0,85) | 6,50     | 0,85                                       | 24             | 63                 |
| F 130       | 2,00     | (1,5x0,9)                                  | 130            | 67                 |
| F 300       | 5,00     | (2,45x1,4)                                 | 300            | 50                 |
| F 1950      | 1,60     | (3,2x2,0)                                  | 1950           | 40                 |

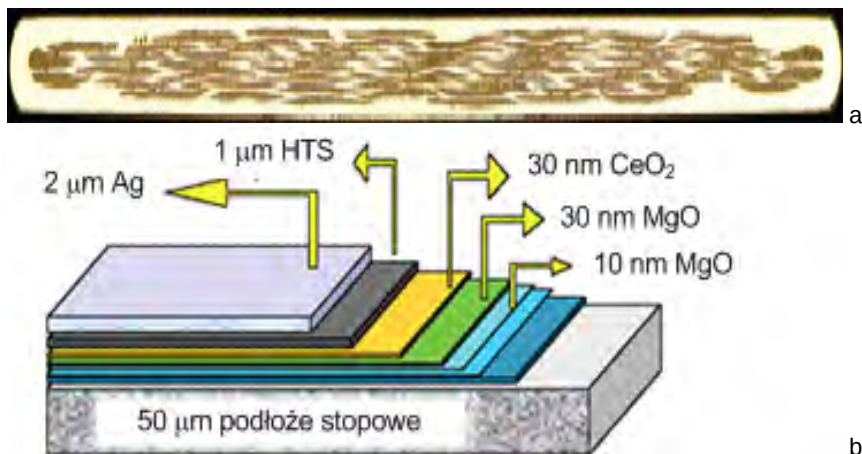
Tablica 1.3. Charakterystyki krytyczne wybranych przewodów kołowych Nb<sub>3</sub>Sn VACRYFLUX w temperaturze 4,2 K [1,2]

| typ      | liczba<br>włókien | Øprzew<br>[mm] | $I_c$ , A |      |      |      |
|----------|-------------------|----------------|-----------|------|------|------|
|          |                   |                | 8 T       | 10 T | 12 T | 14 T |
| NS       | 4500              | 0,50           | 202       | 136  | 78   | –    |
|          | 10000             | 1,00           | 753       | 504  | 289  | –    |
| HNST     | 4500              | 0,50           | 171       | 123  | 86   | 58   |
|          | 10000             | 1,00           | 636       | 456  | 321  | 215  |
| NS Tal   | 6000              | 0,70           | 305       | 204  | 117  | -    |
|          | 13000             | 1,25           | 973       | 652  | 373  | -    |
| HNST Tal | 6000              | 0,70           | 258       | 185  | 130  | 87   |
|          | 13000             | 1,25           | 822       | 591  | 416  | 279  |

### 1.2.2. Przewody HTS – Bi-2212, Bi-2223, Y-123

Opracowanie technologii wytwarzania przewodów ze stopów LTS zajęło kilkadziesiąt lat od odkrycia zjawiska nadprzewodnictwa. Opracowanie technologii wytwarzania przewodów z ceramik HTS zajęło tylko kilka lat od odkrycia materiałów HTS. Obecnie wytwarzane są dwa typy przewodów nawojowych z nadprzewodników wysokotemperaturowych. Są to taśmy I i II generacji. Podział taśm na I (1G) i II generacji (2G) wynika z technologii ich wytwarzania.

Taśmy pierwszej generacji mają budowę kompozytową i składają się z wielu włókien nadprzewodnika HTS w matrycy srebrnej. Taśmy o podwyższonej wytrzymałości są dodatkowo laminowane stalą. Taśmy te wytwarzane są techniką rurowo-proszkową. Najkorzystniejsze parametry uzyskiwane są dla taśm I generacji z nadprzewodników Bi-2223 i Bi-2212.



Rys.1. 3. Taśma HTS 1G BSCCO (a) i 2G YBCO (b) [2, 3]

Taśmy II generacji składają się z wielu warstw: podłoża - zapewniającego dobre parametry elektryczne, stabilizatora - poprawiającego właściwości mechaniczne i termiczne oraz warstwy nadprzewodnika. Kolejne warstwy nanoszone są na podłożu techniką fizycznego (PVD) lub chemicznego (CVD) osadzania próżniowego lub osadzania metalorganicznego (MOD). Taśmy II generacji wytwarzane są na bazie nadprzewodnika YBCO [3].

Tablica1.4 Parametry taśm nadprzewodnikowych I generacji [4]

| Producent                    | Wymiary taśmy, mm |       | Prąd krytyczny taśmy, A | Oferowana długość taśmy |
|------------------------------|-------------------|-------|-------------------------|-------------------------|
|                              | szer.             | grub. |                         |                         |
| AMSc Bi2223/Ag               | 3,1               | 0,16  | 70÷85                   | do 1000 m               |
|                              | 4,1               | 0,21  | 115÷155                 | do 800 m                |
| AMSc Bi2223/Ag/Fe            | 3,1               | 0,25  | 70÷85                   |                         |
|                              | 4,1               | 0,305 | 115÷135                 |                         |
| AMSc Bi2223/Ag               | 4,2               | 0,15  | 30 - 60                 |                         |
|                              | 4,0               | 0,35  | 30 - 60                 | 400 m                   |
| AMSc Bi2223/Ag/Fe            | 4,3               | 0,26  | 140÷155                 |                         |
|                              | 4,9               | 0,30  | 125÷145                 |                         |
| EHTS Bi-2223/AgMg            | 4,0               | 0,22  | 100                     | do 500 m                |
| EHTS Bi-2223/AgAuMg          | 4,0               | 0,25  | 102                     | do 600 m                |
| Sumitomo Electric Bi-2223/Ag | 4,3               | 0,22  | 110÷150                 | do 600 m                |
|                              | 3,2               | 0,17  |                         |                         |
|                              | 4,3               | 0,22  | 80÷110                  |                         |
| Innost Bi-2223/Ag            | 4,2               | 0,23  | 90                      | 400 m                   |

Tablica 1.5 Parametry taśm nadprzewodnikowych II generacji [3,4]

| Producent      | Wymiary taśmy |          | Prąd krytyczny taśmy, A | Oferowana długość taśmy |
|----------------|---------------|----------|-------------------------|-------------------------|
|                | grub. mm      | grub. mm |                         |                         |
| 344 AMSc YBCO  | 0,15          | 4,33     | 60 – 90                 | do 200 m                |
| 344S AMSc YBCO | 0,2           | 4,33     | 70 – 90                 | do 200 m                |
| SF 12050 YBCO  | 0,055         | 12       | 200 – 300               | do 600 m                |
| SCS 12050 YBCO | 0,095         | 12       | 200 – 250               | do 600 m                |
| YHC-HC YBCO    | 0,105         | 40       | 1000                    | 40 m                    |
| THEVA CC DyBCO | 0,1           | 10       | 200–250                 | 40 m                    |

### **1.3. Budowa urządzeń nadprzewodnikowych**

Urządzenie elektryczne nazywamy nadprzewodnikowym, jeżeli w swej budowie zawiera elementy wykonane z nadprzewodnika i pracujące w stanie nadprzewodzącym. Elementem nadprzewodnikowym może być uzwojenie, przepust, tor prądowy, złącze Josephsona, rura, cylinder, bifilarny stos czy inna kształtka. Materiał nadprzewodnikowy stanowi często tylko część objętości i masy urządzenia. Zazwyczaj tylko elementy nadprzewodnikowe urządzenia są umieszczone w kriostacie i chłodzone do temperatur kriogenicznych w przedziale od kilku do kilkudziesięciu kelwinów a pozostałe podzespoły urządzenia pracują w temperaturze otoczenia powyżej 290 K.

Zastosowanie nadprzewodników zamiast przewodników konwencjonalnych pozwala na zwiększenie średnich gęstości prądu w urządzeniach nawet o 2 rzędy wielkości. Tak duże gęstości prądu pozwalają na generowanie pól magnetycznych o indukcjach rzędu 30 T za pomocą uzwojeń z nadprzewodników niskotemperaturowych i rzędu 60 T za pomocą uzwojeń z nadprzewodników wysokotemperaturowych [2]. Duża wartość indukcji magnetycznej oraz duże gęstości prądu generują olbrzymie naprężenia mechaniczne, wywołane siłą Lorentza, przekraczające wytrzymałość mechaniczną materiałów nadprzewodnikowych i konieczne jest stosowanie dodatkowych elementów konstrukcyjnych.

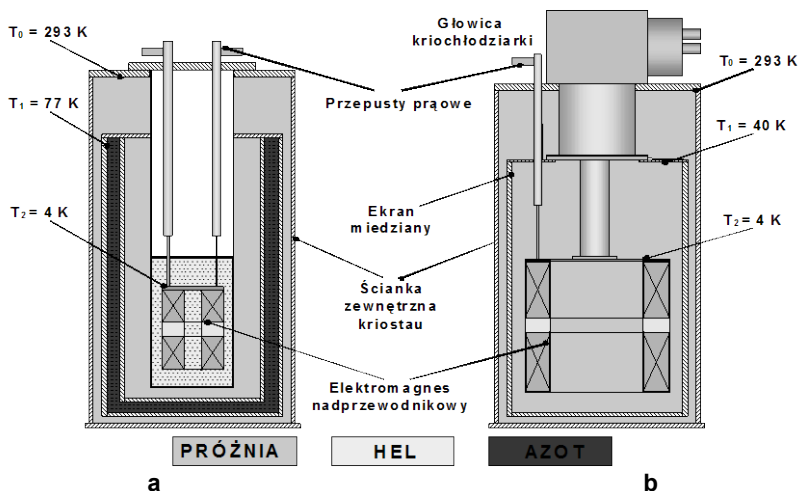
#### **1.3.1. Chłodzenie urządzeń nadprzewodnikowych**

Podstawowym i najtrudniejszym do utrzymania parametrem decydującym o nadprzewodnictwie jest temperatura. Maksymalna temperatura krytyczna nadprzewodników niskotemperaturowych nie przekracza 25 K. W praktyce urządzenia z takich nadprzewodników pracują w temperaturze 4,2 K i niższych przy technikach chłodzenia z użyciem ciekłego helu [1]. Temperatura ta może być wyższa (np. 10 K) przy chłodzeniu kriochłodziarką. Urządzenia nadprzewodnikowe są izolowane termicznie od otoczenia, co realizowane jest przez umieszczenie ich w specjalnych kriostatach wyposażonych w złożoną izolację termiczną minimalizującą dopływ ciepła z zewnątrz drogą przewodnictwa, konwekcji i promieniowania. Jest to zazwyczaj wysokopróżniowa izolacja termiczna z wielowarstwowymi ekranami z folii aluminiowej minimalizującymi dopływ ciepła przez promieniowanie (izolacja wielowarstwowa) i z miedzianymi ekranami cieplnymi schładzanymi parami helu lub ciekłym azotem, bądź połączonymi z 1-szym stopniem kriochłodziarki. Zabiegi te mają zminimalizować dopływ ciepła z zewnątrz i utrzymać temperaturę urządzeń na poziomie umożliwiającym pracę w stanie nadprzewodzącym.

System chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych odbiera ciepło dopływające do wnętrza kriostatu z zewnątrz przez izolację termiczną, ścianki kriostatu, przepusty prądowe i pomiarowe oraz ciepło wydzielane podczas pracy w stanach przejściowych (załączanie i wyłączanie urządzenia oraz zmiany prądu roboczego), ciepło wydzielane w skutek zakłóceń oraz ciepło wynikające ze strat promiennoprądowych w nadprzewodnikach. Do chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych wykorzystywane mogą być kriochłodziarki oraz ciecze



kriogeniczne: ciekły hel (temperatura wrzenia 4,2 K), ciekły wodór (temperatura wrzenia 20,4 K) oraz ciekły azot (temperatura wrzenia 77,4 K).



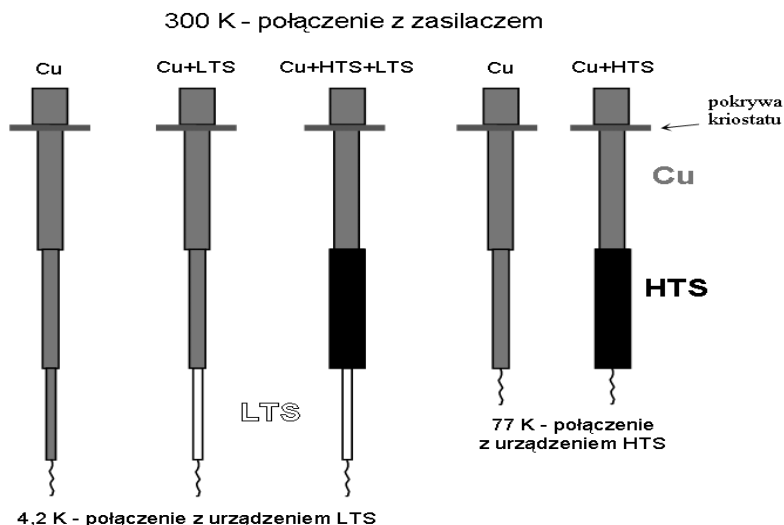
Rys. 1.4. Chłodzenie urządzeń nadprzewodnikowych (a) technika w kąpieli; (b) technika kontaktowa

Można wyróżnić cztery podstawowe techniki chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych: chłodzenie w kąpieli, chłodzenie wymuszone, chłodzenie kontaktowe (przy wykorzystaniu kriołodziarki) oraz chłodzenie w kąpieli ze wspomaganie [2].

### 1.3.2. Krioprzepusty prądowe

Krioprzepusty prądowe są powszechnie stosowane jako integralne części elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych.

Zasadę budowy krioprzepustów prądowych z miedzi oraz materiałów LTS i HTS przedstawia rys.1.5. Prąd roboczy płynący od zasilacza do urządzenia nadprzewodnikowego umieszczonego w kriostracie przepływa przez krioprzepusty prądowe. Ciepły koniec krioprzepustu prądowego przyłączony do źródła prądu ma temperaturę pokojową (293 K). Zimny koniec krioprzepustu, przyłączony do urządzenia nadprzewodnikowego pracuje zwykle w temperaturze ciekłego helu (4,2 K) albo ciekłego azotu (77 K). Krioprzepusty prądowe mogą być wykonane z materiałów nienadprzewodnikowych jak i z nadprzewodnikowych zarówno HTS i LTS. Strumień ciepła dopływający przez krioprzepust prądowy do wnętrza kriostratu oraz ciepło Joule'a generowane w nienadprzewodnikowych lub nienadprzewodzących częściach krioprzepustu przez prąd zasilający urządzenie elektryczne mogą zwiększyć zużycie cieczy kriogenicznych, gdy stosowana jest technik chłodzenia w kąpieli lub nawet uniemożliwić schłodzenie urządzenia do wymaganej temperatury pracy, gdy stosowana jest technika chłodzenia kontaktowego.



Rys. 1.5. Budowa krioprzepustów prądowych wykonanych z różnych materiałów

Rezystancja krioprzepustów i przewodów łączących zasilacz z krioprzepustami oraz rezystancja wewnętrzna zasilacza przy zerowej rezystancji urządzenia nadprzewodnikowego są czynnikami ograniczającymi maksymalny prąd w obwodzie z elementami nadprzewodnikowymi. Ze względu na konieczność minimalizacji rezystancji, krioprzepusty prądowe powinny mieć możliwie duży przekrój poprzeczny. Z drugiej strony przez duży przekrój poprzeczny dopływa duży strumień ciepła do wnętrza kriostatu na drodze przewodnictwa cieplnego. Zmniejszenie przekroju krioprzepustu zmniejsza dopływ ciepła z zewnątrz ale jednocześnie zwiększa straty Joule'a w krioprzepuscie, przez który płynie duży prąd. Krioprzepusty miedziane mają stopniowany przekrój, ponieważ wraz ze spadkiem temperatury przepustu zmniejsza się rezystywność miedzi i można zmniejszyć przekrój nie powodując wzrostu strat Joule'a, a zmniejszając dopływ ciepła wzdłuż przepustu.

#### 1.4. Wybrane zastosowania nadprzewodników

Materiały nadprzewodnikowe i wytwarzane z nich przewody pozwalają budować urządzenia, maszyny i aparaty elektryczne znajdujące różnorodne zastosowania. Niektóre z wymienionych w tablicy 6 urządzenia są omówione poniżej w pracy.

##### 1.4.1 Elektromagnesy nadprzewodnikowe

Materiały nadprzewodnikowe w postaci przewodów wykorzystywane są do budowy stałoprądowych elektromagnesów wytwarzających silne pola magnetyczne w dużych przestrzeniach roboczych. Elektromagnesy

nadprzewodnikowe stosowane są w fizyce cząstek elementarnych do skupiania i odchyłania strumienia cząstek a przykładem takiego zastosowania są elektromagnesy z uzwojeniem Nb-Ti zastosowane w CERN'ie w akceleratorze LHC. Uzwojenia nadprzewodnikowe elektromagnesów polu roboczym 8,3 T i bardzo dużej jednorodności pozwalają osiągnąć energię wiązki rzędu 7 TeV. Magnesy nadprzewodnikowe w CERN-ie znajdują się także w detektorach ATLAS i CMS. Nadprzewodniki w CERN-ie wykorzystywane są także do budowy nadprzewodnikowych przepustów prądowych do zasilania nadprzewodnikowych magnesów akceleratora i detektorów.

Do budowy wszystkich magnesów nadprzewodnikowych w CERN-ie zużyto 1200 ton nadprzewodnika niskotemperaturowego Nb-Ti, w formie kabla nadprzewodnikowego Rutherforda, w stabilizatorze aluminiowym, o wymiarach 72 x 22,3 mm, o łącznej długości 7600 km. Wykonawcami kabla były dwie firmy: Furukawa Electric z Japonii i Outokumpu z Finlandii. Do wyprodukowania całego potrzebnego nadprzewodnika zużyto dwuletnią światową produkcję niobu.

Tablica 1.7. Główne i korekcyjne magnesy LHC [6]

| Typ  | Ilość | Funkcja                      | Indukcja magnetyczna, T | Prąd, A |
|------|-------|------------------------------|-------------------------|---------|
| MB   | 1232  | Główne dipole                | 8,33                    | 11850   |
| MQ   | 400   | Główne kwadrupole            | 8,33                    | 11850   |
| MSCB | 376   | Magnesy korekcyjne: dipol    | 1,28                    | 550     |
|      |       | sextupol                     | 2,90                    | 550     |
| MQT  | 256   | Kwadrupole korekcyjne        | 125 T/m                 | 550     |
| MQTL | 36    | Długie kwadrupole korekcyjne | 125 T/m                 | 550     |
| MCBC | 266   | Dipole korekcyjne            | 3,11                    | 100     |
| MCS  | 2464  | Sextupole korekcyjne         | 1970 T/m <sup>2</sup>   | 550     |
| MO   | 336   | Oktopole korekcyjne          | 2,8                     | 550     |



Rys. 1.6. Magnesy nadprzewodnikowe w akceleratorze LHC: główne kwadrupole (a); główne dipole w „coldmasie” (b); korektor MSC (c) [6]

Tablica 1.8. Główne zastosowania nadprzewodników [5]

| Zastosowane                          | Cel/<br>funkcja                                          | Niskie straty | Zwarta budowa | Mała masa | Moment obrotowy | Wysoka indukcja | Praca ciągła | Utrzymanie | Stabilność | Uwagi                                                 |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------|---------------|-----------|-----------------|-----------------|--------------|------------|------------|-------------------------------------------------------|
| MRI                                  | silne pola magnetyczne                                   | o             |               |           |                 |                 |              | o          | •          | powszechnego dostępu                                  |
| NMR                                  | bardzo silne pola magnetyczne                            | o             |               |           |                 | •               |              |            |            | częstotliwość >1 GHz                                  |
| Kable energetyczne<br>(AC/DC)        | duże gęstości energii, zwarta budowa                     | •             | o             |           |                 |                 |              |            | o          | nowoczesne zastosowania                               |
| Transformatory                       | trakcyjne                                                |               | o             | •         |                 |                 |              |            |            | mała masa                                             |
|                                      | energetyczne                                             | •             | o             |           |                 |                 |              |            |            | zwarta budowa                                         |
| Ograniczniki prądu<br>(SFCL)         | ograniczanie prądów zwarciovych                          | o             |               |           |                 |                 |              |            | o          | zastosowanie w istniejącej sieci elektroenergetycznej |
| Zasobniki energii<br>(SMES)          | magazynowanie energii elektrycznej                       | o             |               |           |                 | •               |              |            |            | stabilizacja sieci elektroenergetycznej               |
| Lewitacja<br>magnetyczna<br>(MAGLEV) | szybkobieżne pociągi                                     |               | o             | •         |                 |                 |              | •          | •          | Niezawodność, korzyści ekonomiczne                    |
| Napędy morskie                       | zwarta budowa, mała masa, niskie straty                  | •             | •             | •         | •               |                 | •            | o          | •          | 400 kW                                                |
| Napędy lotnicze                      | mała masa                                                | o             | o             | •         |                 |                 | o            |            |            | US Air Force                                          |
| Synteza kryształów                   | eliminacja konwekcji                                     | o             |               |           |                 | •               |              |            | o          | pojedyncze kryształy kwarcu                           |
| Robotyka                             | precyzja, mała masa                                      |               | o             | o         | •               |                 |              |            |            | Napędy o zwartej budowie                              |
| Narzędzia<br>mechaniczne             | napędy bezprzekładniowe precyzja, wysoki moment obrotowy |               |               | o         | o               |                 |              | •          |            | wysoka precyzja                                       |
| Separacja<br>magnetyczna             | oczyszczanie                                             | o             |               |           |                 | •               |              |            | o          | oczyszczanie ścieków                                  |
| Motoryzacja                          | wysoki moment obrotowy, niskie straty                    | •             | •             | •         | •               |                 |              |            |            | ogniwa paliwowe                                       |
| Generatory wiatrowe                  | uproszczenie budowy                                      |               | o             | •         | o               |                 | o            |            |            | mała masa                                             |

Główne dipole, o długości 17,5 m i ciężarze 35 t, służą do zaginania wiązki na łukach akceleratora. Wyprodukowane zostały przez Alstom – Francja, Ansaldo – Włochy i Noell – Niemcy. Główne kwadropole o długości 7,5 m i ciężarze 8 t, służą do ogniskowania wiązki na prostych odcinkach akceleratora. Głównym ich producentem był Accel z Niemiec. Magnesy korekcyjne, zapewniające odpowiednią optykę wiązki, umieszczone są razem z magnesami głównymi we wspólnych kriostratach, tworząc zespoły magnesów nadprzewodnikowych.

Elektromagnesy nadprzewodnikowe pozwalają na magazynowanie energii elektromagnetycznej w SMES-ach. W badaniach nad kontrolowaną syntezą termojądrową do ogniskowania plazmy wykorzystywane jest pole magnetyczne wytwarzane przez elektromagnesy nadprzewodnikowe. Elektromagnesy nadprzewodnikowe wykorzystywane są z powodzeniem w aparaturze NMR i aparaturze MRI. Elektromagnesy nadprzewodnikowe w aparaturach NMR i MRI są obok elektromagnesów nadprzewodnikowych separatorów magnetycznych jednym z pierwszych komercyjnych zastosowań nadprzewodnictwa w dużych urządzeniach.

Odpowiednia konstrukcja uzwojenia elektromagnesu nadprzewodnikowego ma zapewnić możliwość chłodzenia oraz przenoszenia dużych dynamicznych i statycznych sił mechanicznych.

Siły dynamiczne powstające na skutek oddziaływania prądów o dużych gęstościach z polem magnetycznym o dużej indukcji mogą być o kilka rzędów wielkości większe niż w uzwojeniach konwencjonalnych. Pomimo że wytrzymałość materiałów uzwojenia wzrasta w temperaturach helowych o ok. 30 %, a wytrzymałość np. Nb-Ti jest wyższa od wytrzymałości miedzi prawie czterokrotnie, siły te stanowią poważne zagrożenie mechaniczne dla uzwojeń i konstrukcji wsporczych. Aby wyeliminować ruchy uzwojeń pod wpływem wielkich sił, zwiększa się ich sztywność przez wzmocnienie obęczami lub "bandażowanie" taśmą usztywniającą oraz przez impregnację np. żywicą epoksydową.

Siły statyczne powstają w skutek nierównomiernego kurczenia się materiałów uzwojenia podczas jego schładzania od temperatury spoczynkowej (temperatury wykonania – zazwyczaj bliskiej 293 K) do temperatury pracy w zakresie od kilku do kilkudziesięciu kelwinów.

#### **1.4.2. Maszyny elektryczne**

Budowę generatorów nadprzewodnikowych rozpoczęto w 1970 roku, bazując na przewodach LTS (Nb-Ti). Zbudowano i przetestowano 20 MVA generator nadprzewodnikowy, który był pierwszą nadprzewodnikową maszyną wirującą. Kolejną maszyną nadprzewodnikową LTS był 70 MW generator, zbudowany i przetestowany przez konsorcjum Japanese w roku 1990. Oba generatory wykonane były z nadprzewodnika Nb-Ti. Pomimo początkowych sukcesów związanych ze zmniejszeniem masy i gabarytów generatorów, przy jednoczesnym zwiększeniu mocy i sprawności, nie znalazły one zastosowania w elektroenergetyce.

Maszyny LTS wymagały skomplikowanego układu chłodzenia i izolacji

Odkrycie nadprzewodników wysokotemperaturowych, pozwoliło na nowo podjąć prace nad maszynami nadprzewodnikowymi. Układy chłodzenia maszyn HTS mają prostszą budowę i większą sprawność, a izolacją termiczną może być próżnia. Do chłodzenia uzwojeń stosuje się ciekły azot, hel gazowy i kriochłodziarki kontaktowe. Wszystko to wpływa na obniżenie kosztów budowy i eksploatacji maszyn HTS, przy jednoczesnym zwiększeniu sprawności, w stosunku do urządzeń konwencjonalnych, oraz zmniejszeniu masy zużytych materiałów [5].

Generatory nadprzewodnikowe HTS posiadają nadprzewodnikowe uzwojenie wzbudzenia, umieszczone na konstrukcji wsporczej wirnika oraz konwencjonalne, miedziane uzwojenie twornika, znajdujące się w bezzłobkowym jarzmie stojanie. Zastosowanie nadprzewodnikowego uzwojenia wzbudzenia pozwala na zmniejszenie strat mocy w rotorze. Twornik generatora nadprzewodnikowego nie posiada złobków i pole magnetyczne w szczelinie maszyny wzbudzane przez uzwojenie wirnika jest mniej odkształcone. Dzięki zastosowaniu nadprzewodnikowego uzwojenia wzbudzenia i podwyższeniu indukcji w szczelinie generatora niemal dwukrotnie, objętość generatora HTS jest około 2 do 3 razy mniejsza niż generatora z uzwojeniami miedzianymi.



- dużą gęstość mocy, pozwalającą zmniejszyć, gabaryty i masę generatora,
- dużą sprawność przy częściowym obciążeniu.

- cichą pracę, ze względu na brak żłobków w stojanie i wirniku,
- małą reakcję synchroniczną, co pozwala na pracę przy bardzo małych kątach obciążenia,
- wytwarzanie napięć z bardzo małą zawartością wyższych harmonicznych.

Jednym z najważniejszych problemów związanych z budową i eksploatacją generatorów i silników HTS jest zapewnienie odpowiedniego chłodzenia uzwojeń nadprzewodnikowych. Na całkowite obciążenie cieplne uzwojenia wirnika składają się między innymi ciepło przewodzone przez układ zawieszenia, przewodzenie cieplne przepustów prądowych oraz straty przemienoprądowe. Straty te podwyższają moc systemu chłodzenia, utrzymującego uzwojenie nadprzewodnikowe w temperaturze niższej od temperatury krytycznej. Do chłodzenia uzwojeń HTS stosuje się gazowy hel i kriochłodziarki mechaniczne Gifforda-McMahona (G-M).

Przykładem zastosowania nadprzewodników HTS do budowy generatora jest generator o mocy 50 MW (Rys.1.8) zbudowany w ramach projektu SuperGenerator w latach 90-tych był nową konstrukcją maszyn synchronicznych z wirnikiem bez żelaza i gładkim, bez żłobkowym stojanem, o indukcji w szczelinie znacznie wyższej niż w maszynach konwencjonalnych.

Tablica 1.9 Parametry SuperGeneratora [9]

|                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Moc znamionowa                  | 50 MW                           |
| Prąd znamionowy                 | 6,6 kA                          |
| Współczynnik mocy               | 0,8 przy obc. indukcyjnym       |
| Prędkość obrotowa               | 3600 obr/min                    |
| Częstotliwość                   | 60 Hz                           |
| Uzwojenie wzbudzenia            |                                 |
| Uzwojenie nadprzewodnikowe HTS  | Taśma BSCCO 2223                |
| Prąd roboczy uzwojenia          | 186 A                           |
| Napięcie nominalne uzwojenia    | <2 V                            |
| Temperatura pracy               | 35 K                            |
| Chłodzenie                      | Gazowy hel, kriochłodziarki G-M |
| Uzwojenia twornika              |                                 |
| Rodzaj uzwojenia                | Miedziane                       |
| Chłodzenie                      | Powietrze                       |
| Maksymalna temperatura przewodu | 120 °C                          |
| Wymiary                         |                                 |
| Średnica zewnętrzna             | 249 cm                          |
| Długość                         | 279 cm                          |
| Masa                            | 28 t                            |

Wymiary SuperGeneratora wynoszą około 1/2 długości i 2/3 średnicy generatora konwencjonalnego tej samej mocy. Zespół wirnika zawiera uzwojenie wzbudzania HTS z taśmy Bi-2223, w kriostacie próżniowym, konstrukcje wsporczą oraz ekran elektromagnetyczny i termiczny. Rolą ekranu elektromagnetycznego jest tłumienie pól generowanych przez stojan, przenoszenie dużych wahań momentu obrotowego podczas awarii oraz tłumienie oscylacji o niskiej częstotliwości. Zespół stojana zawiera miedziane uzwojenie twornika oraz osłonę (Rys.1.8)

Pole magnetyczne wytwarzane przez nadprzewodnikowe uzwojenie wzbudzania SuperGeneratora ma dwukrotnie wyższą indukcję niż pole wytwarzane w analogicznym uzwojeniu konwencjonalnym i wynosi 1,6 T.

Omawiany generator charakteryzuje się bardzo małą reaktancją synchroniczną - 0,28 pu. Przy pełnym obciążeniu jego kąt obciążenia wynosi 10,4 stopni. Reaktancję synchroniczną porównywalnego generatora konwencjonalnego wynosi 2 pu przy kącie obciążenia 50 stopni w znamionowym obciążeniu. SuperGenerator może więc pracować w szerokim zakresie obciążeń bez konieczności zmiany wzbudzenia pola, a jego praca jest sztywna i stabilna. Całkowita sprawność SuperGeneratora przy pełnym obciążeniu wynosi 98,6 % i utrzymywana jest dla wartości obciążenia większych od 0,5 obciążenia znamionowego.

#### **1.4.4 Nadprzewodnikowe silniki elektryczne**

Silniki nadprzewodnikowe budowane są jako maszyny synchroniczne prądu przemiennego, w których miedziane uzwojenie wirnika zastąpione jest uzwojeniem nadprzewodnikowym HTS [8,9]. Wirnik silnika HTS nie zawiera żelaza, a uzwojenie zamontowane jest na specjalnej konstrukcji wsporczej. Ponieważ gęstość prądu w uzwojeniu nadprzewodnikowym jest znacznie większa niż w konwencjonalnym, możliwe jest uzyskanie wyższej indukcji magnetycznej w szczelinie. Powoduje to znaczne zmniejszenie wymiarów i masy silnika, podobnie jak w przypadku generatora HTS. Zastąpienie uzwojenia miedzianego bezrezystancyjnym uzwojeniem nadprzewodnikowym wpływa na znaczne ograniczenie strat mocy w wirniku, a tym samym na zwiększenie sprawności silnika [1], [2]. Ze względu na dużą gęstość prądu wzbudzania w uzwojeniu HTS, moment obrotowy silnika, proporcjonalny do prądu wzbudzania, jest bardzo duży. Dlatego też zespół wirnika musi sprostać surowym wymaganiom wytrzymałościowym i termicznym. Uzwojenie stojana nadprzewodnikowych silników synchronicznych HTS nie jest umieszczone w żłobkach, ale w gładkim jarzmie, osłonięte ekranem elektro-magnetycznym. Wpływa to nie tylko na zmniejszenie masy i wymiarów stojana ale także w znacznym stopniu redukuje hałas emitowany przez silnik. Zalety silników HTS są analogiczne do zalet generatorów [8].

Jednym z najważniejszych obszarów zastosowań silników nadprzewodnikowych jest marynarka. W napędach morskich jest szczególnie istotne minimalizowanie masy i wymiarów maszyn oraz urządzeń napędowych, a także poziomu drgań i hałasu, co powoduje, że maszyny nadprzewodnikowe znalazły zastosowanie na okrętach i statkach wcześniej niż w innych gałęziach gospodarki. Ponadto w napędach morskich do bezpośredniego napędu śruby



stosowane są silniki wolnobieżne, o mocach do kilkudziesięciu MW, w których zmniejszenie masy i wymiarów, w stosunku do maszyn konwencjonalnych, jest bardzo duże. Również koszty chłodzenia dużych maszyn są relatywnie mniejsze niż w małych.

#### 1.4.5. Silniki i generatory HTS dla jednostek pływających

W napędach morskich jest szczególnie istotne minimalizowanie masy i wymiarów maszyn i urządzeń napędowych, oraz poziomu drgań i hałasu, co powoduje, że maszyny nadprzewodnikowe znalazły zastosowanie na okrętach i statkach wcześniej niż w innych gałęziach gospodarki. Ponadto w napędach morskich do bezpośredniego napędu śruby stosowane są silniki wolnobieżne, o mocach do kilkudziesięciu MW, w których zmniejszenie masy i wymiarów, w stosunku do maszyn konwencjonalnych, jest bardzo duże. Również koszty chłodzenia dużych maszyn są relatywnie mniejsze niż w małych.

##### a) Silnik HTS 5 MW

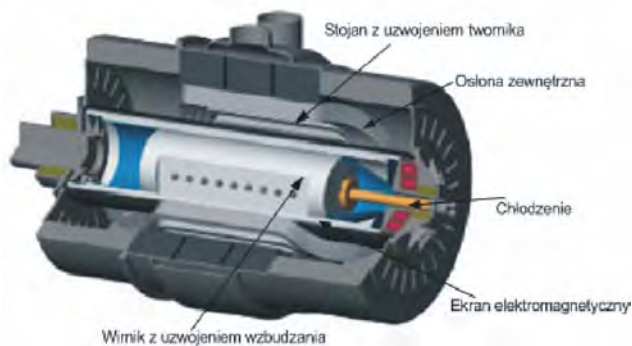
Pierwszym zbudowanym silnikiem do bezpośredniego napędu śruby okrętowej był silnik HTS o mocy 5 MW i prędkości obrotowej 230 obr/min (tabl.3, rys.1.9), [3], chłodzony gazowym helem i chłodziarkami kontaktowymi typu G-M.

Tablica . 1.10. Parametry synchronicznego silnika HTS o mocy 5 MW [3]

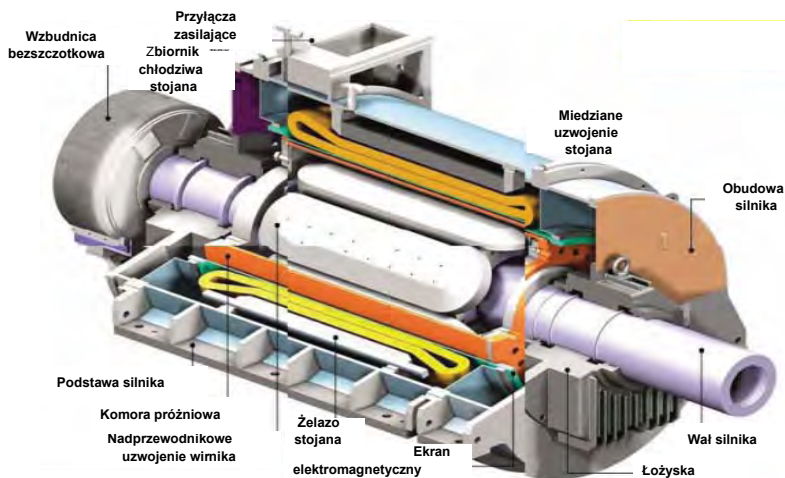
|                                        |                                  |
|----------------------------------------|----------------------------------|
| Moc                                    | 5 MW                             |
| Prędkość obrotowa                      | 230 obr/min                      |
| Sprawność                              | 96%                              |
| Liczba par biegunów                    | 3                                |
| Napięcie                               | 4,16 kV                          |
| Prąd twornika                          | 722 A                            |
| Liczba faz                             | 3                                |
| Częstotliwość                          | 11,5 Hz                          |
| Masa                                   | 23 t                             |
| Wymiary (długość/ wysokość, szerokość) | 2,5m / 1,9m / 1,9m               |
| Chłodzenie uzwojenia HTS               | Hel gazowy + kriochłodziarki G-M |

##### b) Silnik 25 MW

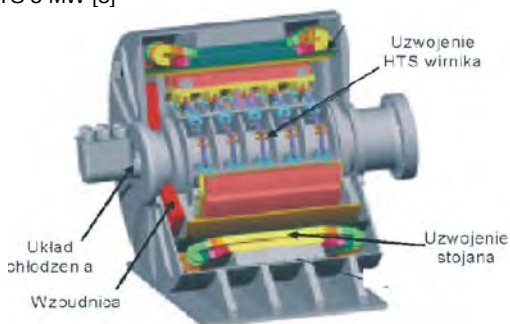
Silnik posiada uzwojenie stojana, chłodzone wodą, oraz nadprzewodnikowe uzwojenie wirnika, chłodzone kriochłodziarkami mechanicznymi. Sprawność omawianego silnika wynosi 97% przy prędkości maksymalnej oraz 99% przy 1/3 prędkości maksymalnej. Masa silnika o długości 2,08 m i średnicy 2,65 m wynosi 60 t, Rys. 1.10. [1].



Rys. 1.8. Schemat SuperGeneratora [9]



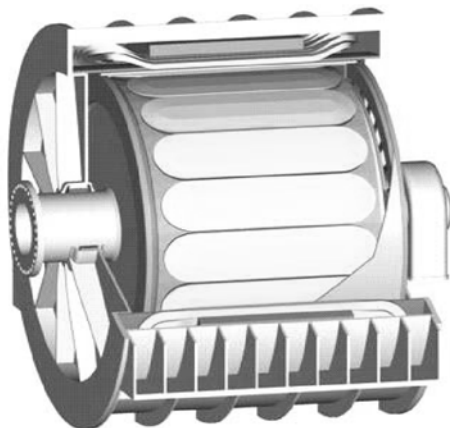
Rys. 1.9. Silnik HTS 5 MW [3]



Rys. 1.10. Silnik HTS 25 MW [1]

### c) Silnik 36,5 MW

Kolejnym osiągnięciem w budowie silników morskich było uruchomienie w 2006 silnika HTS o mocy 36,5 MW (49000 KM) i prędkości obrotowej 120 obr/min, którego parametry zamieszczone są w tablicy 4 [4].



Rys. 1.11. Wirnik silnika HTS 36,5 MW [4]

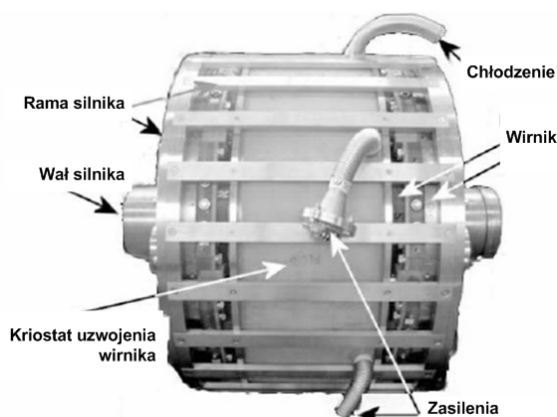
Silnik ten przeznaczony jest do napędu najnowszej generacji okrętów Marynarki Wojennej USA.

Tablica 1.10. Parametry synchronicznego silnika HTS o mocy 36,5 MW [3]

|                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Moc                           | 36 5 MW                          |
| Prędkość obrotowa             | 120 obr/min                      |
| Sprawność                     | 97%                              |
| Liczba par biegunów           | 8                                |
| Napięcie                      | 6 kV                             |
| Prąd twornika                 | 1270 A                           |
| Liczba faz                    | 9                                |
| Częstotliwość                 | 16 Hz                            |
| Masa                          | 75 t                             |
| długość/ wysokość / szerokość | 3,4m / 4,6m / 4,1m               |
| Chłodzenie uzwojenia HTS      | Hel gazowy + kriochłodziarki G-M |

### d) Silnik 365 kW

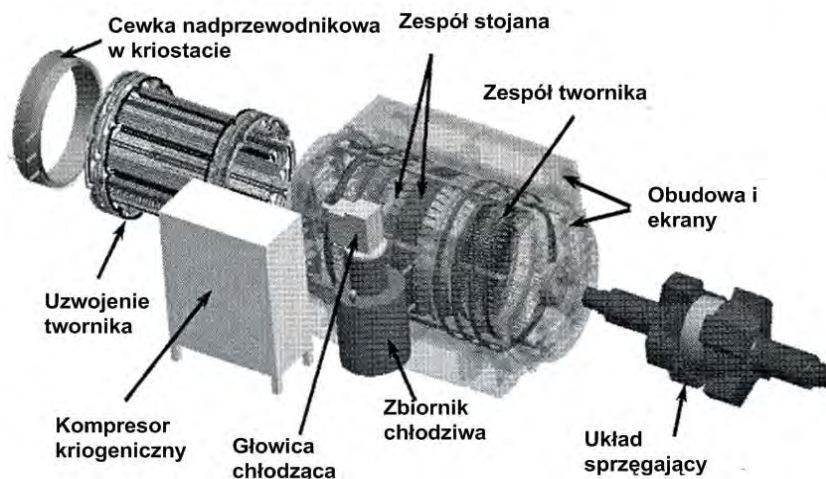
Wiele projektów silników okrętowych zrealizowano w ostatnich latach w Japonii [5]. Ostatnio zbudowano, oraz przeprowadzono próby eksploatacyjne, silnika HTS o mocy 365 kW (490 KM), prędkości obrotowej 250 obr/min, długości 1,2 m, średnicy 0,8 m i masie 4,4 t. Uzwojenie HTS wykonane jest z taśmy Bi-2223, chłodzonej gazowym helem do temperatury 30K.



Rys. 1.12. Japoński silnik 365 kW [2]

#### 1.4.6. Generatory szybkoobrotowe i silniki wolnoobrotowych HTS o mocy 36MW

Nowoczesne rozwiązania generatorów i silników dla marynarki opiera się na konstrukcji HIA (homopolar inductor alternator). Jest nią generator szybkoobrotowy zbudowany w oparciu o stacjonarną, nadprzewodnikową cewkę wzbudnika, lekkiego wirnika, oraz konwencjonalnego stojana zawierającego żłobkowane uzwojenie twornika wraz z żelaznym jarzmem oraz wodnym układem chłodzenia, rys.1.13, [4]



Rys. 1.13. Schemat generatora szybkoobrotowego z uzwojeniem nadprzewodnikowym HTS [4]

Nadprzewodnikowe uzwojenie wzbudnika umieszczone jest wokół ferromagnetycznego wirnika z wystającymi nabiegunnikami, umieszczonymi na obu jego końcach. Uzwojenie wzbudnika wytwarza pole stacjonarne, które współdziałając z wirującym żelazem wirnika, generuje wirujące pole magnetyczne. Pole to pełni podobną funkcję jak pole wzbudzenia w standardowych maszynach synchronicznych.

Wydzielenie uzwojenia wzbudnika z wirnika i uczynienie go stacjonarnym pozwala osiągnąć wiele korzyści, w stosunku do maszyn konwencjonalnych [4]:

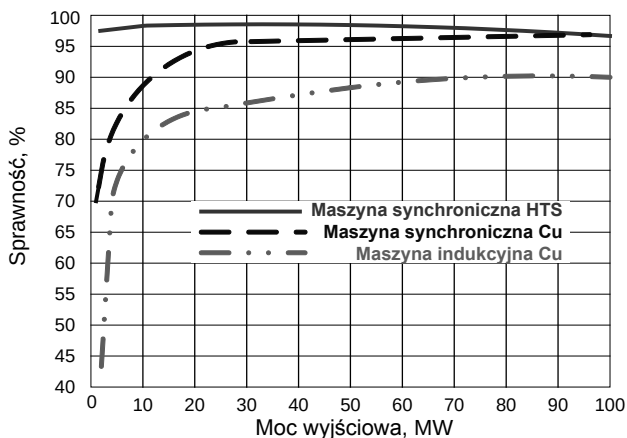
- stacjonarne uzwojenie wzbudnika nie powoduje powstawania sił odśrodkowych, które mogą pojawić się przy uzwojeniu wzbudnika umieszczonym na wirniku.
- uzwojenie może być wykonane w postaci prostej cewki solenoidalnej a nie bardziej skomplikowanej cewki typu racetrack, wymagającej dodatkowo specjalnej konstrukcji wsporczej.
- łatwiej jest także zapewnić odpowiednią izolację termiczną oraz chłodzenie cewki nadprzewodnikowej, umieszczonej na zewnątrz wirnika. kriostat uzwojenia ma prostą budowę, jako izolację termiczną stosuje się próżnię lub superizolację warstwową, natomiast do chłodzenia uzwojeń można zastosować kriochłodziarki kontaktowe.
- mniejsze siły dynamiczne w uzwojeniu wzbudnika a tym samym mniejsze naprężenia pozwalają wykorzystać do jego budowy nadprzewodniki wysokotemperaturowe hts – bscço oraz ybco. duża gęstość prądu nadprzewodników hts, zwłaszcza ybco, pozwala na ograniczenie wartości amperozwojów uzwojenia wzbudnika, co ogranicza ilość taśmy nadprzewodnikowej potrzebnej do jego wykonania.
- eliminacja pierścienia ślizgowego, stosowanego w maszynach konwencjonalnych w celu dostarczenia prądu do uzwojenia wzbudnika z zewnętrznej wzbudnicy.
- brak konieczności stosowania obrotowych szczotek zewnętrznej wzbudnicy.

W tabl. 5 przedstawiono parametry techniczne nadprzewodnikowego generatora szybkoobrotowego opracowanego w Air Force Research Laboratory.

Maszyny nadprzewodnikowe posiadają wiele zalet w porównaniu z maszynami konwencjonalnymi o takiej samej mocy. Ponieważ uzwojenia HTS w maszynach znajdują się w stałej temperaturze nie są narażone na występowanie naprężeń cieplnych w przeciwieństwie do uzwojeń konwencjonalnych. Nie wymagają zatem częstych przeglądów i konserwacji. Ponieważ materiały HTS mogą przewodzić prąd o większych wartościach w przewodach o znacznie mniejszych przekrojach i niższych stratach energii, ogólna sprawność urządzeń jest większą nawet przy uwzględnieniu zasilania układów chłodzenia.

Tablica 1.11. Parametry generatora szybkoobrotowego 36 MW i silnika wolnoobrotowego 36 MW [4]

| Urządzenie                                                  | Generator | Silnik          |
|-------------------------------------------------------------|-----------|-----------------|
| Moc, MVA                                                    | 36        | 36              |
| Zastosowanie                                                | Generator | Silnik okrętowy |
| Prędkość obrotowa, obr/min                                  | 3600      | 120             |
| Napięcie, kV                                                | 6,6       | 3,8             |
| Liczba faz                                                  | 3         | 3               |
| Liczba biegunów                                             | 6         | 18              |
| Częstotliwość, Hz                                           | 180       | 18              |
| Sprawność przy pełnym obciążeniu, %                         | >98       | >95             |
| Długość taśmy nadprzewodnikowej, m                          | 6000      | 11000           |
| Nadprzewodnik                                               | BSCCO     | BSCCO           |
| Prąd krytyczny taśmy w polu własnym i w temperaturze 77K, A | 150       | 150             |
| Średnica, cm                                                | 200       | 290             |
| Długość, cm                                                 | 110       | 400             |
| Moc chłodziarki kriogenicznej, kW                           | 14,4      | 14,4            |
| Masa chłodziarki kriogenicznej, kg                          | 300       | 300             |
| Całkowita masa, kg                                          | 12000     | 100000          |



Rys. 1.14. Porównanie sprawności synchronicznych maszyn klasycznych i nadprzewodnikowych, o tej samej mocy [3]

Mniejsze gabaryty i masa jednostek napędowych pozwalają lepiej wykorzystać wyporność i przestrzeń ładunkową jednostek pływających

Przyszłość maszyn nadprzewodnikowych, związana jest z dalszym rozwojem synchronicznych silników okrętowych, zwłaszcza zespołów szybkobieżnych generatorów HTS i wolnoobrotowych silników HTS.

#### 1.4.7. Kable nadprzewodnikowe

Zastosowanie nadprzewodników w kablach energetycznych znajduje się w centrum uwagi wielu ośrodków przemysłowych i energetycznych. Wykorzystanie kabli nadprzewodnikowych w energetyce może znacznie obniżyć straty energii podczas jej transportu. Na podstawie badań przeprowadzonych w USA stwierdzono że około 10 % energii wytworzonej zostaje stracona zanim dotrze do odbiorców [10].

Wiele firm i konsorcjów międzynarodowych zajmuje się więc opracowaniem najlepszych konstrukcji kabli nadprzewodnikowych. Wybrane projekty zamieszczono w tablicy 1.12. Na rysunku 1.15 przedstawiona jest przykładowa konstrukcja kabla nadprzewodnikowego HTS chłodzonego ciekłym azotem.



Rys. 1.15. Budowa kabla nadprzewodnikowego HTS (Nexans)

Na rysunku 1.16 przedstawiony jest kabel trójżyłowy konstruowany wspólnie przez Southwire Company (USA) i NKT Cables (Dania) o napięciu 13.2 kV o prądzie 3.0 kA chłodzony ciekłym azotem.



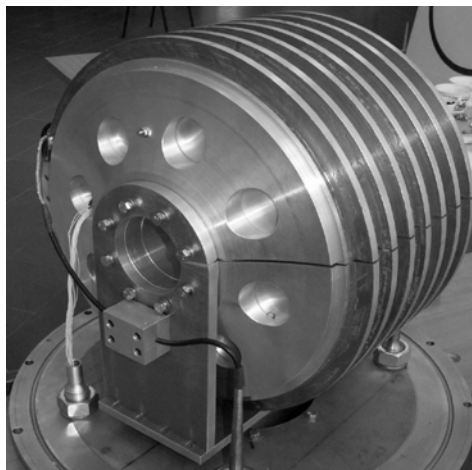
Rys. 1.16. Kabel trójżyłowy HTS Triax Cable [4]

Tablica 1.12 Realizacje kabli nadprzewodnikowych na świecie

| Instytucja                 | Kable                     |                                 | Taśma HTS    |                       | Rok rozp. |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------|-----------------------|-----------|
| Pirelli                    | 24 kV / 2400 A / 120 m    | trzy kable jednożyłowe          | Bi 2223      | AMSc                  | 2001      |
| LS Cable                   | 22,9 kV / 1250 A / 100 m  | trzy kable jednożyłowe w jednym | Bi 2223      |                       | 2007      |
| Super Power, Sumitomo, BOC | 34,5 kV / 800 A / 350 m   | trzy kable jednożyłowe w jednym | Bi2223/ YBCO | Sumitomo/ Super Power | 2006      |
| Ultra, ORNL                | 13,2 kV / 3000 A / 200 m  | kabel trójżyłowy                | Bi 2223      | AMSc                  | 2006      |
| AMSc, Nexans, AirLiquide   | 138 kV / 2400 A / 600 m   | trzy kable jednożyłowe          | Bi 2223      | AMSc                  | 2007      |
| Southwire, NKT             | 13,8 kV / 60 MVA / 1760 m | kabel trójżyłowy                | TBD          | TBD                   | 2007      |

#### 1.4.8 Nadprzewodnikowe zasobniki energii (SMES)

Pierwsze pomysły gromadzenia energii elektrycznej w polu magnetycznym cewki powstały już ponad 100 lat temu, natomiast wykorzystanie materiałów nadprzewodnikowych do tego rodzaju urządzeń zaproponowane było w 1960 roku. Pionierskie prace w tej dziedzinie były prowadzone w Uniwersytecie w Wisconsin w którym dopiero w roku 1970 zaczęto poważne badania naukowe związane z urządzeniem SMES [11].



Rys. 1.17. Nadprzewodnikowy elektromagnes Bi-2223 dla SMES'a o energii 10 kJ /50K wykonany w lubelskiej Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki w Warszawie [12]



Pierwsze urządzenia tego typu miały gromadzić energię elektryczną co najmniej 5000 MWh. Idea ta była realizowana poprzez budowę solenoidalnych cewek o średnicy 1 kilometra. Umieszczane były pod powierzchnią ziemi. Cewki te miały mieć rozmiary większe niż jakiegokolwiek urządzenia nadprzewodnikowe budowane i projektowane w tym czasie, dlatego podejmowano się wtedy jedynie przygotowań koncepcji i ewentualnie wykonania kosztorysu takiego urządzenia.

Dopiero w roku 1980 zakłady przemysłowe zauważyły korzyści płynące z zastosowania urządzeń SMES i aktywnie włączyły się do działań prowadzących do ulepszania tych urządzeń. W roku 1987 Departament Obrony Stanów Zjednoczonych zdecydował o rozpoczęciu prac nad nadprzewodnikowym zasobnikiem energii o energii 20 MWh. System ten miał pracować jako urządzenie zasilające w laserze nad którym prowadzono badania.

Obecnie SMES'y postrzegane są głównie jako urządzenia wspomagające sterowanie przemysłowymi układami energetycznymi. Niezawodność i wysoka jakość dostarczanej energii ma kluczowe znaczenie dla przemysłu.

Tablica 1.13. Parametry wybranych SMES-ów opracowanych w USA [11,12]

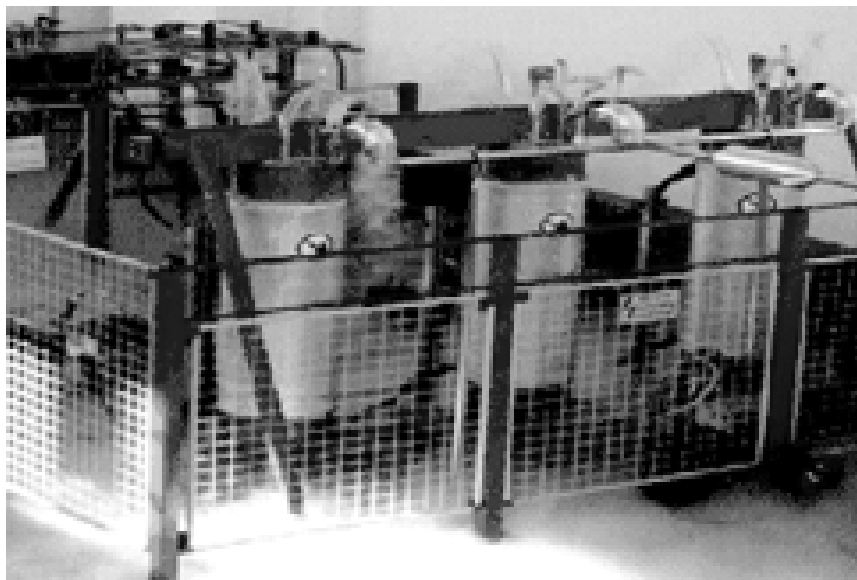
| kraj      | organizacja           | typ            | specyfikacja           |
|-----------|-----------------------|----------------|------------------------|
| Finlandia | Uniwersytet w Tampere | HTS $\mu$ SMES | 160 A/ 200 V, 5 kJ     |
| Finlandia | Uniwersytet w Tampere | LTS $\mu$ SMES | 275 A/ 200 V, 0,2 MJ   |
| Niemcy    | EUS GmbH              | HTS $\mu$ SMES | 100 A/ 200 V, 8 kJ     |
| Niemcy    | ACCEL                 | HTS $\mu$ SMES | 80 A/ 400 V, 150 kJ    |
| Niemcy    | FZK Research Center   | LTS $\mu$ SMES | 2,5 kA/ 6 kV, 0,22 MJ  |
| Niemcy    | FZK Research Center   | LTS $\mu$ SMES | 300 A/ 700 V, 0,25 MJ  |
| Niemcy    | TU Munich             | LTS $\mu$ SMES | 1380 A/ 3 kV, 1 MJ     |
| Włochy    | CESI                  | LTS $\mu$ SMES | 1 MVA, 4 MJ            |
| Hiszpania | ASINEL                | LTS $\mu$ SMES | 1 kA/ 500 V, 1 MJ      |
| USA       | FSU – CAPS            | LTS SMES       | 4 kA/ 24 kV, 100 MJ    |
| Japonia   | projekt rządowy       | LTS SMES       | 10 kA, 100 MW, 2,2 GJ  |
| Japonia   | JAERI                 | LTS SMES       | 3 kA/ 32,6 kV, 71,1 MJ |
| Japonia   | KEPCo                 | LTS SMES       | 1 kA/ 500 V, 3,6 MJ    |
| Japonia   | KEPCo                 | HTS $\mu$ SMES | 600 A, 4 kJ            |
| Korea     | KEMCo                 | LTS $\mu$ SMES | 0,9 kA, 1 MJ           |
| Izrael    | IECo                  | HTS $\mu$ SMES | 110 A, 0,24 kJ-1,5 kJ  |

Opracowane w ostatnich latach projekty i realizacje przemysłowych zastosowań nadprzewodnikowych zasobników energii obejmują trzy grupy: układy mikrozasobników o energiach rzędu MJ wchodzących częściowo w fazę

komercjalizacji, układy o energiach rzędu GJ (lub MWh), będące jeszcze w fazie studiów projektowych i konstrukcyjnych, a także zasobniki wysokotemperaturowe o niewielkich energiach w zakresie kilodżuli, których technologia wymaga jeszcze intensywnych badań [11].

#### 1.4.9. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu FCL

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciovych (SFCL – superconducting fault current limiter) składają się z nieliniowych elementów o zmiennej impedancji, włączanych szeregowo w obwód elektryczny. Wykazują one małą impedancję podczas pracy w warunkach znamionowych chronionego obwodu elektrycznego oraz dużą impedancję w warunkach zwarcia w chronionym obwodzie. Szybki powrót zdolności do ograniczania prądu po ustąpieniu zwarcia oraz długi czas pracy przy niewielkich kosztach eksploatacyjnych to podstawowe zalety nadprzewodnikowych ograniczników prądów zwarciovych [13].



Rys. 1.18. Widok 3-fazowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu o mocy 1,2 MVA (ABB-Szwajcaria)

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu ograniczają zarówno prąd udarowy jak i składową okresową prądu zwarciovego, więc zmniejszone zostają nie tylko skutki cieplne ale również skutki dynamiczne działania prądu zwarciovego na urządzenia w sieci. Zastosowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądowych pozwala ograniczyć prądy zwarciovie, przekraczające prądy znamionowe 10÷20 krotnie, do wartości nie większych niż 3÷6 krotność prądu znamionowego.

Badania nad nadprzewodnikowymi ogranicznikami prądowymi prowadzone są w wielu centrach badawczych na całym świecie [14]. Prace te doprowadziły do powstania szeregu projektów i prototypów, których wybrane parametry zostały przedstawione w tablicy 13.

Tablica 1.14 Wybrane projekty nadprzewodnikowych ograniczników prądu [13]

|                    | typ         | HTS            | parametry elektryczne |
|--------------------|-------------|----------------|-----------------------|
| Siemens, Niemcy    | 1 f. rez.,  | Y-123          | 765 V/ 135 A          |
| ABB, Szwajcaria    | 3 f. ind.,  | Bi-2212        | 1,2 MVA/10,5 kV/70A   |
| ABB, Szwajcaria    | 1 f. rez.,  | Bi-2212        | 8 kV/800 A            |
| MOST, Korea        | 1 f. rez.,  | Y-123          | 6,6 kV/ 200 A         |
| MOST, Korea        | 3 f. most., | Bi-2223        | 2,3 MVA               |
| ACCEL, Niemcy      | 1 f. rez.,  | Bi-2212, Y-123 | 10 MVA                |
| CURL 10, Niemcy    | 3 f. rez.,  | Bi-2212        | 10 MVA/10 kV/600 A    |
| Hiszpania          | 1 f. hybr., | Y-123          | 17 MVA                |
| DOE, USA           | 3 f. most., | Bi-2223        | 26 MVA/ 15 kV         |
| Siemens, Niemcy    | 3 f. rez.,  | Y-123          | 30 MVA                |
| Super-ACE, Japonia | 3 f. most., | Bi-2223        | 66 kV/ 750 A          |

#### 1.4.10. Nadprzewodnikowe transformatory

Transformatory z uzwojeniami nadprzewodnikowymi są jednymi z obiecujących zastosowań nadprzewodników w urządzeniach elektrycznych. Zastosowanie uzwojeń nadprzewodnikowych w miejsce uzwojeń konwencjonalnych przynosi wiele korzyści. Straty Joule'a ze względu na zerową rezystancję nadprzewodnika są wyeliminowane. Nie da się jednak całkowicie wyeliminować strat histerezowych i wirowych powstających w metalowej matrycy nadprzewodnika przy prądzie przemiennym. Wartość prądu zwarcia nie może wzrosnąć ponad wartości prądu krytycznego uzwojenia nadprzewodnikowego transformatora, ponieważ po osiągnięciu prądu krytycznego, uzwojenia wychodzą ze stanu nadprzewodzenia. Wyeliminowany jest olejowy układ chłodzenia, co poprawia bezpieczeństwo oraz zmniejsza negatywny wpływ na otoczenie. Gabaryty i masa transformatorów HTS są mniejsze [15].

Zasada działania transformatorów nadprzewodnikowych jest taka sama jak konwencjonalnych [2]. W obu przypadkach występuje rdzeń, będący obwodem magnetycznym oraz przynajmniej dwa uzwojenia; pierwotne i wtórne. Jednak ze względu na konieczność chłodzenia uzwojeń nadprzewodnikowych budowa ich różni się od budowy transformatorów konwencjonalnych.

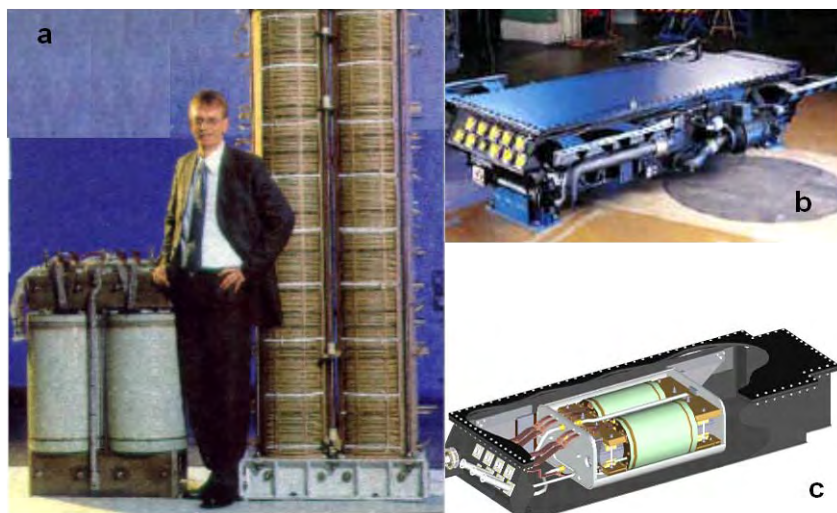
Mniejsze wymiary i masy transformatorów z uzwojeniami nadprzewodnikowymi predysponują je do zastosowania w napędach trakcyjnych. W tablicy 15 zamieszczono porównanie parametrów konwencjonalnego i nadprzewodnikowego transformatora trakcyjnego o mocy 1 MVA [15]

Tablica 1.15 Parametry transformatorów z uzwojeniami HTS [15]

|         | Instytucja                                                          | Rok  | Dane techniczne                                                                                                               |
|---------|---------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Niemcy  | ABB                                                                 | 2003 | <b>100MVA</b> , 3-fazowy, nadprzewodnik Bi-2223, konfiguracja trójkąt–gwiazda, 225 kV/ 20 kV, 50 Hz                           |
|         | Siemens AG                                                          | 2002 | <b>1MVA</b> , 1-fazowy, nadprzewodnik Bi-2223, 25kV/1,389kV, 40 A/2 x 360 A, 50 Hz                                            |
| USA     | Waukesha El. System, IGC Super Power, U.S. DOE                      | 2002 | <b>5MVA</b> , 3-fazowy, konfiguracja trójkąt–gwiazda, 24,9 kV/4,2 kV, 67A/694 A                                               |
|         |                                                                     | 2005 | <b>30MVA</b> , 3-fazowy, nadprzewodnik Bi-2212, konfiguracja trójkąt – gwiazda, 138 kV /13.8 kV, 72 A/1255 A, 60 Hz           |
| Japonia | Fuji El. Adv. Techn. Railway Tech.Res. Institute, Res.Inst. of Sc   | 2002 | <b>3MVA</b> , 1-fazowy, nadprzewodnik Bi-2223, 25kV/1kV, 120A/4 x 750 A, 60 Hz – transformator trakcyjny                      |
|         |                                                                     | 2006 | <b>4MVA</b> , 1-fazowy 3 – uzwojeniowy, nadprzewodnik Bi-2223, 25kV/1,2kV/ 440 V, 160A/ 755 A/ 909A – transformator trakcyjny |
|         | Fuji Electric & Japanese Electr.Comm.                               | 2005 | <b>2MVA</b> , 1-fazowy, nadprzewodnik Bi-2223, 66Kv/6,9Kv, 33,3A/290A, 60hZ                                                   |
|         | Kyushu Electric Power Co. Inc.                                      | 2007 | <b>20MVA</b> , 3-fazowy, nadprzewodnik YBCO, 66 kV/6,9kV, 175A/1674A, 60 Hz                                                   |
| Korea   | Hyundai Heavy Industries Co.                                        | 2005 | <b>60MVA</b> , 3 - fazowy, konfiguracja trójkąt – gwiazda, nadprzewodnik YBCO, 154kV/ 23 kV, 225 A/1506 A, 60 Hz              |
|         | KESRI, Korean Min. of Com., Ind. and En., Elec. Ins.and Sc Res.Ins. | 2007 | <b>100MVA</b> , 1-fazowy, 3 – uzwojeniowy, nadprzewodnik Bi-2223, 154 kV / 22,9 kV /6,6 kV, 370 A/ 2500 A/ 1600 A             |

Tablica 1.15 Porównanie transformatorów trakcyjnych o mocy 1 MVA z uzwojeniami konwencjonalnymi i HTS [16]

| Transformator trakcyjny    | Z uzwojeniami Cu    | Z uzwojeniami HTS   | Stosunek HTS/Cu |
|----------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| Straty całkowite           | 93 kW               | 7,8 kW              | 9 %             |
| Masa całkowita             | 4800 kg             | 2200 kg             | 46 %            |
| Objętość rdzenia i uzwojeń | 690 dm <sup>3</sup> | 360 dm <sup>3</sup> | 51 %            |



Rys. 1.19. Porównanie transformatorów trakcyjnych o mocy 1 MVA: z uzwojeniami konwencjonalnymi i HTS (a); transformator trakcyjny HTS w obudowie (b); przekrój (c)

Materiały nadprzewodnikowe i wytwarzane z nich przewody nawojowe pozwalają budować urządzenia, maszyny i aparaty elektryczne znajdujące różnorodne zastosowania. W pracy przedstawiono tylko zastosowania silnoprądowe materiałów nadprzewodnikowych. Poza zastosowaniami w silnoprądowych urządzeniach materiały nadprzewodnikowe znalazły zastosowanie w elektronice i metrologii, technice komputerowej i spintronice.

## 1.5. Literatura

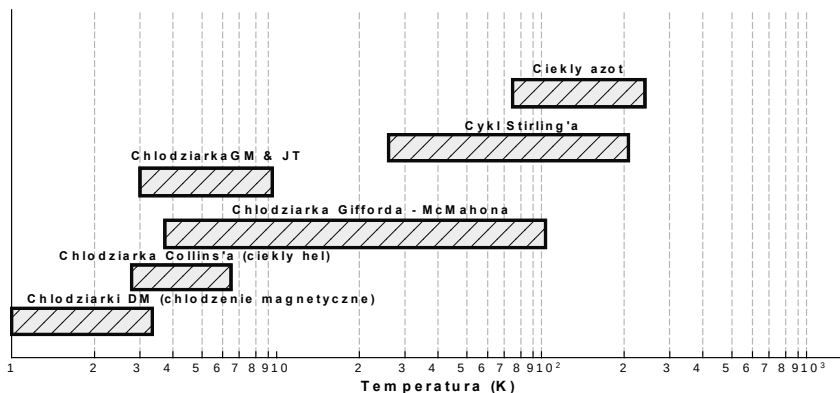
- [1] Cyrot M., Pawuna D., Wstęp do nadprzewodnictwa. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe, PWN, Warszawa, 1996.

- [2] Kozak S., Modelowanie elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 221, 2005.
- [3] Parnas Paranthaman M., Izumi T., High performance YBCO coated Superconductor wires, MRS Bulletin, Vol. 29, No. 8, August 2004, pp. 533-537, IOP Publishing Ltd.
- [4] Materiały inf.: AMSc, THEVA GmbH, Nexans, Sumitomo El. Ltd., EHTS, SuperPower Ltd., 2003 – 2008.
- [5] Sato K., Present Status and Future Perspective of High-Temperature Superconductors, SEI Technical Review, No 66, April 2008, pp. 55-67.
- [6] Wojtasiewicz G., Zastosowanie nadprzewodników w fizyce cząstek elementarnych w CERN, ZN-8, 2007, str. 90-97, ISBN: 9788361301-15-8.
- [7] Wilson M. N., Superconducting magnet, Clarendon Press, Oxford 1990.
- [8] Janowski T., Wojtasiewicz G., Nadprzewodnikowe maszyny elektryczne, Przegl. Elektr., Nr 6/2008, str. 157-160.
- [9] Kalsi S. S., Gamble B., Ige O., The Status of the Ship Propulsion Motor Developments, AES 2005.
- [10] Sivasubramaniam K., Laskaris E.T., Shah M.R., Bray J.W. Garrin N.R.: High-Temperature Superconducting Homopolar Induktor Alternator for Marine Applications, IEEE Trans. on App. Sup., Vol. 18, Nr 1, 2008.
- [11] Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Kozak S., Majka M., Malinowski H., Wojtasiewicz G., Surdacki P., Monografia: Nadprzewodnikowe zasobniki energii, Liber Duo 2007, ISBN 978-83-61301-04-2.
- [12] Wojtasiewicz G., Janowski T., Kozak S., Kondratowicz-Kucewicz B., Majka M., Bi-2223 Magnet for the Model of SMES, Journal of Physics: Conf. Series 97 (2008) 012019
- [13] Janowski T., Stryczewska H. D., Kozak S., Malinowski H., Wojtasiewicz G., Surdacki P., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Monografia: Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu, Liber 2002, ISBN: 83-89373-04-1221120-50.00.
- [14] Kozak J., Janowski T., Kozak S., Malinowski H., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Design And Testing of 230 V Inductive Type of Superconducting Fault Current Limiter With an Open Core, IEEE Trans. on App. Sup., Vol.15, No.2, June 2005, pp. 2031-2034.
- [15] Kalsi S., ASC, Superconducting Transformers, Webster J., (ed), Willey Enc. of El. and Electr. Online, Copyright © 1999 by John Willey & Sons, Inc.
- [16] Weigel W., D., Reduction of energy consumption in traction systems with superconducting transformer, UIC Railway Energy Efficiency System, Paris 2000.

## 2. UKŁADY CHŁODZENIA URZĄDZEŃ NADPRZEWODNIKOWYCH

### 2.1. Wprowadzenie

Przy obecnym stanie wiedzy wszelkie prace związane z zastosowaniem nadprzewodnictwa, zarówno w nauce jak i technice, są nieodzownie związane z techniką wytwarzania niskich temperatur. Aby możliwa była praca urządzenia nadprzewodnikowego niezbędne jest wytworzenie temperatury niższej od temperatury krytycznej zastosowanego nadprzewodnika. Zadanie wytworzenia i utrzymania tej temperatury spoczywa na układach chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych. Rysunek 2.1 przedstawia zakresy temperatur uzyskiwanych przy użyciu różnych układów i technik chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych.



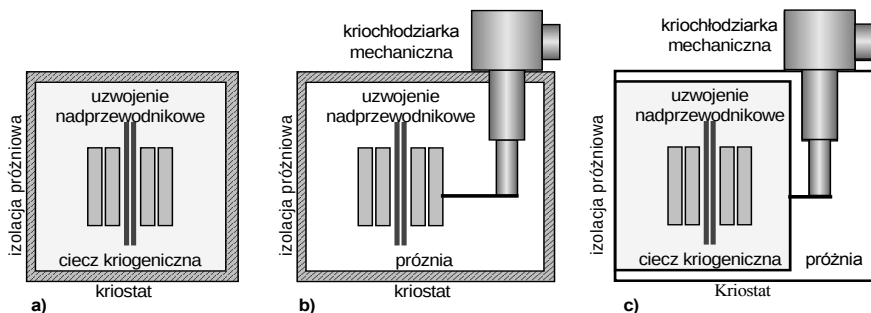
Rys.2.1. Zakres temperatur pracy zastosowań komercyjnych, uzyskiwanych różnymi metodami chłodzenia [1]

### 2.2. Układy chłodzenia kriogenicznego

Można wyróżnić dwa zasadnicze rodzaje systemów chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych: chłodzenie w układzie otwartym, oraz chłodzenie w układzie zamkniętym. Chłodzenie w układzie otwartym realizowane jest parami cieczy kriogenicznych w tzw. kąpeli kriogenicznej (metoda zanurzeniowa), w specjalnie do tego celu przystosowanych naczyniach izolacyjnych – kriostatach. Wadą tej metody, w przypadku chłodzenia ciekłym helem, jest bezpowrotna utrata helu, parującego z kriostatu, w wyniku odbierania ładunków cieplnych od obiektu chłodzonego. Ze względu na stosunkowo dużą cenę ciekłego helu i jego ograniczone zasoby, oraz na to, że odprowadzenie jednej watogodziny ciepła wymaga zużycia około  $1400 \text{ cm}^3$ , metoda ta okazuje się zbyt kosztowna i nieekonomiczna, zwłaszcza w układach chłodzenia stosowanych na skalę przemysłową. W przypadku chłodzenia ciekłym azotem metoda ta jest nadal stosowana.

Chłodzenie w układzie zamkniętym może być realizowane parami cieczy kriogenicznych, przy użyciu kriochłodziarek mechanicznych, tzw. system „cryogen free” lub w kąpeli ze wspomaganie. Idee realizacji chłodzenia w kąpeli,

chłodzenia kontaktowego oraz chłodzenia w kąpieli ze wspomaganiem ilustruje rysunek 2.2.

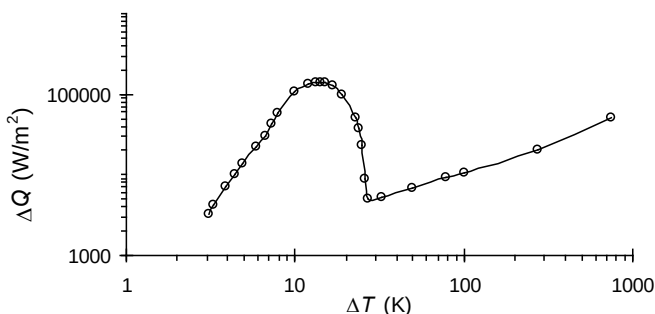


Rys.2.2. Sposoby realizacji chłodzenia uzwojeń nadprzewodnikowych transformatorów: a) chłodzenie w kąpieli; b) chłodzenie kontaktowe; c) chłodzenie w kąpieli ze wspomaganiem

### 2.2.1. Chłodzenie techniką w kąpieli kriogenicznej

Urządzenia nadprzewodnikowe mogą być chłodzone w kąpieli ciekłego helu II ( $T < 2,17$  K), w kąpieli ciekłego helu I ( $T = 4,2$  K), w kąpieli ciekłego wodoru ( $T = 20,4$  K), lub w kąpieli ciekłego azotu ( $T = 77$  K). Do głównych zalet tej techniki chłodzenia należą dobre zdolności chłodzenia i stała temperatura w całym urządzeniu. Duża masa czynnika chłodzącego łatwo pochłania energię zakłóceń a urządzenia wytrzymują bez przerwy w pracy nawet duże zakłócenia mechaniczne. Ze względu na to, że przepływ ciepła z urządzenia do cieczy kriogenicznej odbywa się głównie na drodze konwekcji swobodnej to maksymalny strumień ciepła, który może być odprowadzony do cieczy jest ograniczony i uzależniony od ukierunkowania urządzenia w przestrzeni w stosunku do kierunku siły grawitacji oraz od rodzaju powierzchni. Rysunek 2.3 przedstawia strumień ciepła  $\Delta Q$  przepływający pomiędzy powierzchnią metalową a ciekłym azotem ( $\text{IN}_2$ ) o temperaturze 77 K w funkcji różnicy temperatury  $\Delta T$  pomiędzy powierzchnią z  $\text{IN}_2$ . Transport ciepła z wnętrza urządzenia do brzegu chłodzonego cieczą kriogeniczną odbywa się na drodze przewodnictwa cieplnego. Technika ta zapewnia stałą, równomierną temperaturę całego urządzenia nadprzewodnikowego. Zmianę temperatury pracy urządzenia można uzyskać poprzez zmianę cieczy chłodzącej: azot – 77 K, wodór – 20,4 K czy hel – 4,2 K. Istnieje możliwość bardziej płynnych zmian temperatury zadziałania poprzez regulację ciśnienia cieczy chłodzącej. Wymaga to jednak szczelnego zamknięcia przestrzeni nad cieczą chłodzącą, co może być przyczyną dużych problemów z bezpieczeństwem chłodzonego urządzenia, podczas gwałtownego odparowywania cieczy w zamkniętej przestrzeni, w stanie awaryjnym. Regulacja temperatury w chłodzeniu techniką w kąpieli poprzez zmianę ciśnienia nad cieczą chłodzącą stosowana z powodzeniem przy chłodzeniu np. stałoprądowych elektromagnesów nadprzewodnikowych może powodować zagrożenia w pracy urządzenia, które wykorzystuje przejście nadprzewodzące i może pracować w stanie rezystancyjnym, w którym następuje gwałtowne odparowanie cieczy chłodzącej.





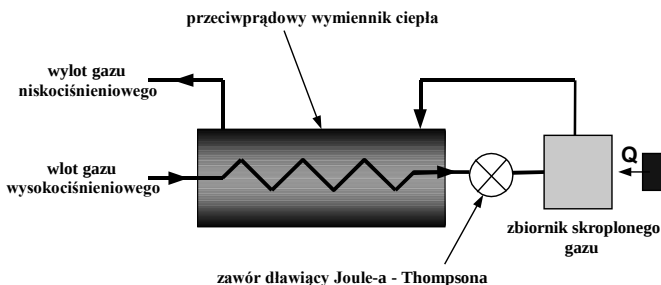
Rys.2.3. Strumień ciepła  $\Delta Q$  przepływający pomiędzy powierzchnią metalową a ciekłym azotem ( $\text{LN}_2$ ) o temperaturze 77 K w funkcji różnicy temperatury  $\Delta T$  pomiędzy powierzchnią z  $\text{LN}_2$ , dla chłodzenia techniką w kąpeli ciekłego azotu [2]

## 2.2.2. Chłodzenie w układzie zamkniętym parami cieczy kriogenicznych

Integralnym elementem zamkniętego układu chłodzenia, w którym chłodzenie odbywa się parami cieczy kriogenicznych, jest skraplarka kriogeniczna. W układzie tym, w odróżnieniu od układu otwartego, pary cieczy kriogenicznych kierowane są do skraplarki kriogenicznej, gdzie po skropleniu powracają do kriostatów, zamykając obwód chłodzenia.

Wśród chłodziarek pracujących na zasadzie skraplania gazu, można znaleźć małe skraplarki dławikowe pracujące na zasadzie dławienia strumienia gazu, wykorzystujące efekt Joule'a – Thompsona jak i duże instalacje przemysłowe do chłodzenia uzwojeń elektromagnesów nadprzewodnikowych, wykorzystujące do chłodzenia hel nadciekły. Zastosowanie zamkniętego obiegu helu w znaczny sposób ograniczyło jego straty, lecz konieczność stosowania skraplarki znacznie zwiększa koszt samego układu oraz jego gabaryty.

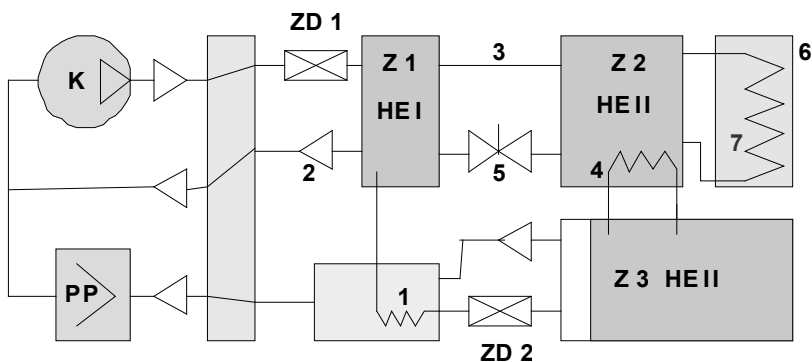
Chłodziarki dławikowe wykorzystują efekt Joule'a – Thompsona, polegający na obniżaniu temperatury w wyniku rozprężania sprężonego gazu za pomocą tzw. zaworu dławiącego. Jeżeli sprężony gaz znajduje się początkowo poniżej swojej temperatury inwersji, dochodzi do obniżenia jego temperatury w wyniku dławienia. Typowa chłodziarka realizująca efekt Joule'a- Thompsona przedstawiona jest na rysunku 2.4.



Rys.2.4. Chłodziarka wykorzystująca efekt Joule'a – Thompsona [2]

Gaz o wysokim ciśnieniu, o temperaturze  $T_1$  i ciśnieniu  $P_1$ , wchodzi do przeciwprądowego wymiennika ciepła, gdzie chłodzony jest przez strumień gazu o niskiej temperaturze. Po wstępnym schłodzeniu w wymienniku, gaz jest rozprężany do niskiego ciśnienia w zaworze dławiącym J-T, w wyniku, czego ulega skropleniu. Uzyskana w ten sposób ciecz kriogeniczna chłodzi obiekt chłodzony. W wyniku przejmowania ładunków cieplnych ulega parowaniu i jako gaz o niskim ciśnieniu,  $P_2$  i temperaturze  $T_2$ , wraca ponownie przez wymiennik ciepła, gdzie chłodzi strumień gazu wysokociśnieniowego, do kompresora.

Przykład instalacji do chłodzenia uzwojeń elektromagnesu nadprzewodnikowego nadciężkim helem, He II, w temperaturze 1,8 K, przedstawia rysunek 2.5.



Rys. 2.5. Schemat instalacji do chłodzenia uzwojeń magnes nadprzewodnikowego helem nadciężnym He II: K – kompresor; PP – pompa próżniowa; ZD1, ZD2 – zawory dławiące; Z1 – zbiornik ciekłego helu; Z2, Z3- zbiorniki helu nadciężnego; 1, 4 – wymienniki ciepła; 2, 3 – przewody łączące; 5 – zawór bezpieczeństwa; 6 – uzwojenie elektromagnesu nadprzewodnikowego; 7 – kanał chłodzący magnes [2]

Po skropleniu, w zbiorniku Z1, strumień zdławionego i schłodzonego helu osiąga ciśnienie  $p = 0,15$  MPa i temperaturę  $T = 4,5$  K. Powstałe pary helu wracają do kompresora K. Ciekły hel He I ze zbiornika Z1 przechodząc przez rekuperatywny wymiennik ciepła, 1, i zawór ZD2, ulega ponownemu dławieniu i w zbiorniku Z3 osiąga wartość ciśnienia  $p = 1500$  Pa i temperatury  $T = 1,8$  K. Ciśnienie w zbiorniku Z2 utrzymuje się (za pomocą pompy próżniowej) równe ciśnieniu w zbiorniku Z1, dzięki połączeniu tych zbiorników kanałem 3. Chłodzenie uzwojenia magnes zachodzi, w warunkach konwekcji wewnętrznej helu He II, wewnątrz węzownicy 7 otaczającej uzwojenie nadprzewodnikowe. Zawór bezpieczeństwa 5 pozwala usunąć hel ze zbiornika Z2 do zbiornika Z jeżeli zachodzi taka konieczność.

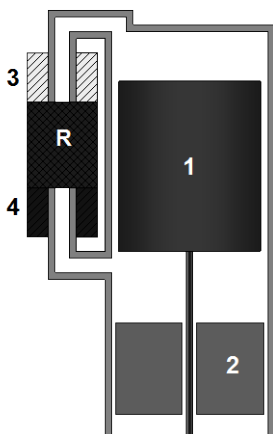
### 2.3. Chłodziarki mechaniczne.

Kriochłodziarki mechaniczne stanowią obszerną grupę urządzeń, wykorzystujących do otrzymania i utrzymania żądanej temperatury pracy zamknięte obiegi termodynamiczne. W roboczych objętościach tych maszyn sukcesywnie zachodzą procesy sprężania i rozprężania gazu roboczego, oraz zmiany ciepła przy zmianach objętości, temperatury czy ciśnienia. Wszystkie te maszyny są urządzeniami tłokowymi o periodycznym przepływie gazu, co stanowi ich wspólną

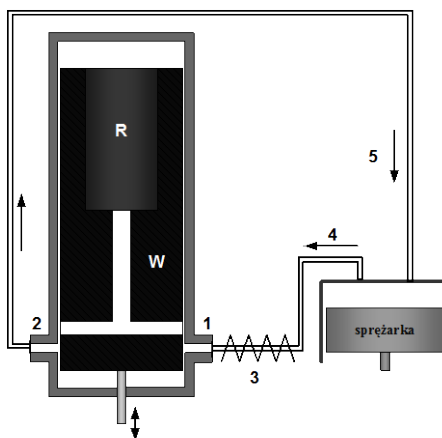
cechę. Kriochłodziarki mechaniczne można również nazwać maszynami z wewnętrzną regeneracją zimna. W przestrzeni roboczej tych chłodziarek znajduje się wymiennik ciepła – regenerator. Efekt chłodniczy powstaje w przestrzeni rozprężania (ekspansji) gazu, która znajduje się w każdej chłodziarce.

Chłodziarki mechaniczne możemy podzielić na dwie grupy [3]:

- z wewnętrznym sprężaniem gazu roboczego, które zachodzi w przestrzeni roboczej maszyny, pomiędzy tłokami: kompresyjnym (sprężającym) i ekspansyjnym (rozprężającym), rysunek 2.6.
- z zewnętrznym sprężaniem gazu roboczego, które odbywa się w kompresorze umieszczonym poza przestrzenią roboczą chłodziarki, rysunek 2.7.



Rys.2.6. Krio-chłodziarka mechaniczna z wewnętrznym sprężaniem czynnika roboczego: 1–tłok ekspansyjny (rozprężający); 2 – tłok roboczy (sprężający); 3 – wymiennik ciepła; 4 – chłodziarka; R – regenerator [3]



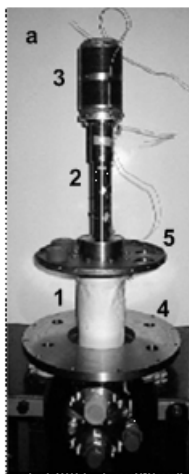
Rys.2.7. Krio-chłodziarka mechaniczna z zewnętrznym sprężaniem czynnika roboczego: 1– zawór wlotowy; 2 – zawór wylotowy; 3 – chłodziarka; 4 – strumień gazu sprężonego; 5 – strumień gazu rozprężonego; W – wymiennik ciepła; R – regenerator [3]

Przedstawicielami pierwszej grupy chłodziarek mechanicznych są chłodziarki realizujące cykl pracy Stirlinga, a drugiej – cykl pracy Gifforda – McMahona.

Główną zaletą chłodziarek mechanicznych, decydującą o ich atrakcyjności w stosunku do chłodziarek pierwszego rodzaju jest: prosta i zwarta budowa, niewielkie gabaryty, duża niezawodność pracy, możliwość otrzymania dowolnej temperatury pracy, oraz co jest istotne znaczne ograniczenie zapotrzebowania na ciekły hel.

Przy wykorzystaniu krio-chłodziarek mechanicznych duże znaczenie ma sposób przejmowania ciepła od obiektu chłodzonego. Z reguły obiekt chłodzony przylega bezpośrednio do zimnego końca chłodziarki, lub jest z nim połączony za

pomocą dobrego przewodnika ciepła (miedziany mostek cieplny). Powoduje to, że ciepło przekazywane jest bezpośrednio do zimnego końca chłodziarki na drodze przewodnictwa, co znacznie usprawnia proces jego przejmowania, a tym samym poprawia sprawność chłodzenia. Ze względu na taki sposób umieszczania obiektu chłodzonego, urządzenia te noszą także nazwę kriochłodziarek kontaktowych. Rysunek 2.8 przedstawia idee realizacji chłodzenia kontaktowego na przykładach realizowanych w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych, z wykorzystaniem kriochłodziarki G-M.



Rys.2.8. Chłodzenie kontaktowe:

a – bezpośrednie; b – za pośrednictwem mostka cieplnego; 1 - 1-wszy stopień głowicy chłodzącej; 2 – 2-gi stopień głowicy chłodzącej; 3 – obiekt chłodzony (połączony bezpośrednio z głowicą chłodzącą – a), oraz za pośrednictwem mostka cieplnego – b); 4 – pokrywa kriostatu; 5 – pokrywa ekranu radiacyjnego; 6– mostek cieplny

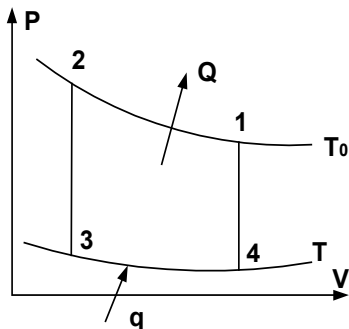
W dalszej części artykułu przedstawione zostaną bliżej kriochłodziarki mechaniczne działające wg cyklu pracy Stirlinga i Gifforda – McMahona.

### 2.3.1. Kriochłodziarki mechaniczne działające wg cyklu pracy Stirlinga.

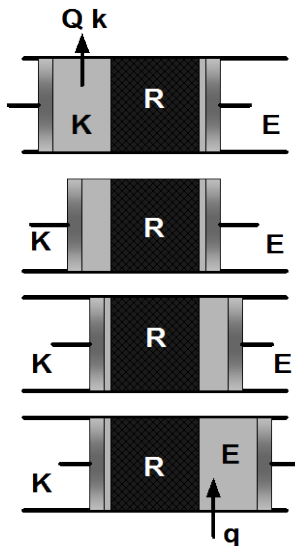
Kriochłodziarki realizujące cykl pracy Stirlinga są maszynami z wewnętrzną regeneracją zimna i z wewnętrznym sprężaniem czynnika roboczego, które zachodzi w przestrzeni pomiędzy tłokami: kompresyjnym i ekspansyjnym. w chłodziarkach tych, w martwej przestrzeni sprężania, umieszcza się wymiennik ciepła – regenerator, co stanowi ich cechę charakterystyczną.

Obieg Stirlinga składa się z dwu izochor ( $V = \text{const.}$ ) i dwu izoterm ( $T = \text{const.}$ ). Odwzorowanie obiegu (w układzie  $p - V$ ) pokazuje rysunek 2.9. Zasadę realizacji biegu pokazano na rysunku 2.10.

W cylindrze umieszczone są dwa tłoki: kompresyjny K i ekspansyjny E, tworząc zamkniętą przestrzeń, w której upieczony jest regenerator R. Lewa część cylindra znajduje się w temperaturze otoczenia  $T_0$ , prawa – w temperaturze kriogenicznej  $T_E$



Rys.2.9. Odwzorowanie obiegu Stirlinga [3]



Rys.2.10.

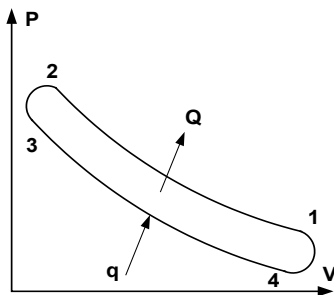
Schemat realizacji obiegu Stirlinga: R- regenerator; K – tłok kompresyjny; E – tłok ekspansyjny; Q – ciepło kompresji; q – ciepło odbierane od obiektu chłodzonego [3]

Obieg Stirlinga możemy podzielić na cztery etapy (rys 9) [3].

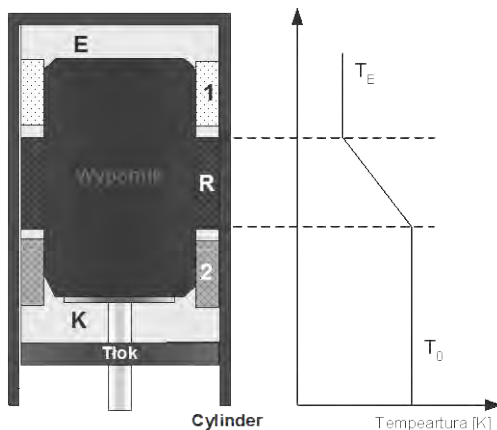
1. **Sprężanie izotermiczne (1-2).** Tłok E jest nieruchomy. Tłok K spręża gaz poruszając się w prawo. Ciepło sprężania oddawane jest do otoczenia. Temperatura sprężania  $T_0$  jest stała.
2. **Izochoryczne rozprężanie gazu w regeneratorze (2-3).** Oba tłoki poruszają się w prawo, powodując przepływ gazu przez regenerator (R). W regeneratorze gaz oziębia się do temperatury  $T_E$ , a jego ciśnienie maleje.
3. **Rozprężanie izotermiczne (3-4).** Tłok K jest nieruchomy. Tłok E przesuwa się w prawo. Gaz rozpręża się i obniża swoją temperaturę. Wskutek dopływu ciepła  $q$  od obiektu chłodzonego (efekt chłodniczy) – temperatura gazu nie zmienia się.
4. **Izochoryczne ogrzewanie gazu (4-1).** Obydwa tłoki poruszają się w lewo, powodując przepływ gazu przez regenerator. Gaz ogrzewa się w regeneratorze do temperatury  $T_0$ , a jego ciśnienie wzrasta. Kiedy tłoki E i K osiągną swoje położenie wyjściowe, proces kończy się.

W odróżnieniu od idealnej maszyny Stirlinga, w maszynie rzeczywistej przerywany ruch tłoków zastąpiono ruchem harmonicznym, znacznie łatwiejszym do realizacji. Harmoniczny ruch tłoków nieco narusza izotermiczność przebiegu procesów sprężania i ekspansji, a także izochoryczność wymiany ciepła w regeneratorze. Objawia się to zmianą kształtu krzywej  $p - V$ , odwzorowującej cykl

Stirlinga (rys. 2.11). Zasadę budowy i działania rzeczywistej kriołodziarki Stirlinga przedstawia rysunek 2.12.



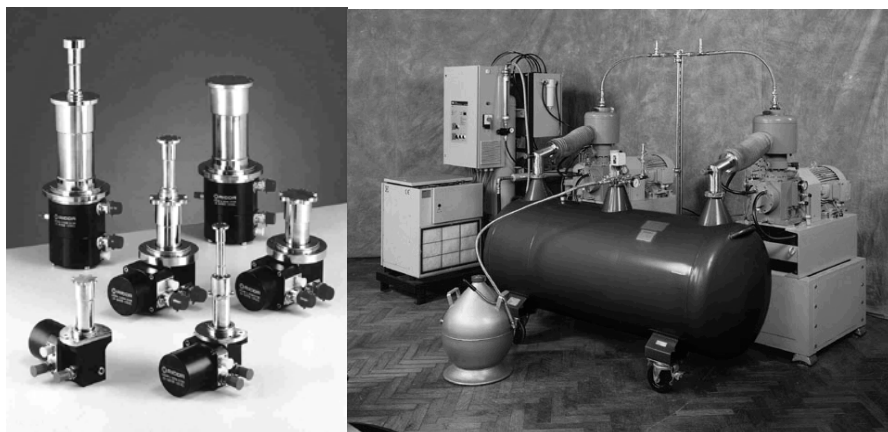
Rys.2.11. Odzworowanie rzeczywistego obiegu Stirlinga [3]



Rys.2.12. Zasada budowy rzeczywistej kriołodziarki Stirlinga. Przebieg zmiany temperatury w regeneratorsze: 1 – wymiennik ciepła; 2 – chłodnica; R- regenerator; E – komora ekspansji; K – komora kompresji [3]

Chłodziarka składa się z cylindra, w którym znajdują się dwa tłoki: kompresyjny i ekspansyjny. Tłok ekspansyjny nie jest obciążony siłami ciśnienia (jest to tłok wyporowy zwany wypornikiem). Tłoki dzielą przestrzeń cylindra na dwie komory: sprężania (K) i ekspansji (E). Komory są ze sobą połączone kanałem, w którym umieszczono: chłodnicę (2), wymiennik ciepła (1) oraz regenerator (R). Komora E znajduje się w temperaturze niskiej i jest odizolowana od otoczenia. Komora K znajduje się w temperaturze bliskiej temperatury otoczenia. Chłodnica służy do odprowadzania ciepła powstałego podczas sprężania gazu w komorze K. Wymiennik ciepła odbiera ciepło od obiektu chłodzonego. Ruch posuwisto – zwrotny tłoków jest realizowany za pomocą wału korbowego.

Rysunek 2.13 przedstawia przykłady komercyjnych kriołodziarek Stirlinga. W tabelicy 2.1 zamieszczono ich podstawowe parametry techniczno – eksploatacyjne.



Rys.2.13. Przykłady kriochłodziarek działających wg cyklu pracy Stirlinga: a) komercyjne przykłady kriochłodziarek Stirlinga; b) układ do skraplania azotu oparty o kriochłodziarkę Stirlinga model MNP 20/2/1000 produkcji Stirling Cryogenics&Refrigerators BV [4]

Tablica 2.1. Parametry techniczno – eksploatacyjne kriochłodziarek Stirlinga [4]

|                       |    |           |                   |       |      |
|-----------------------|----|-----------|-------------------|-------|------|
| Minimalna temp. pracy | K  | 20 - 40   | Wydajność         | l / h | 26   |
| Typowa temp. Pracy    | K  | 70        | Czystość produktu |       | 99 % |
| Moc chłodnicza        | W  | 1,0 – 60  | Cykl pracy        | h     | 6000 |
| Pobór mocy            | kW | 0,5 – 1,5 | Pobór mocy        | W     | 36   |
| Czas pracy            | h  | >20000    | Chłodzenie        | l / h | 2000 |
|                       |    |           | Waga systemu      | kg    | 3400 |

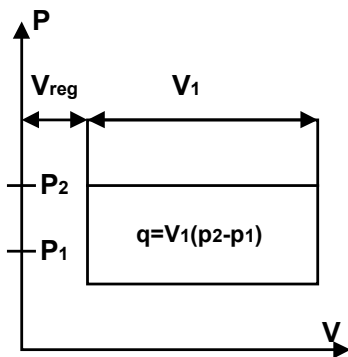
### 2.3.2. Kriochłodziarki mechaniczne działające wg cyklu pracy Gifforda – McMahona.

W 1959 roku Gifforda i McMahona przedstawili nowy obieg chłodniczy i konstrukcję chłodziarki działającej wg. tego obiegu. Jest to maszyna tłokowa z wewnętrzną regeneracją zimną, z zewnętrznym sprężaniem czynnika roboczego. W maszynie tej niską temperaturę osiąga się w procesie swobodnego wypływu gazu ze stałej objętości. Praca procesu sprężania jest oddawana do otoczenia w postaci ciepła.

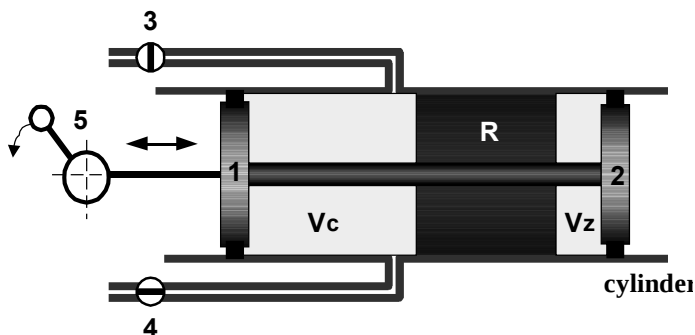
Cykl G – M składa się z dwóch izobar ( $p=\text{const.}$ ) i dwóch izochor ( $v=\text{const.}$ ). Odwzorowanie idealnego obiegu we współrzędnych  $p - V$  oraz sposób realizacji obiegu przedstawiają rysunki 2.14 i 2.15.

W cylindrze (1) umieszczono dwa tłoki (2) i (3), które są ze sobą trwale połączone. Przestrzeń pomiędzy tłokami jest stała i nazywa się przestrzenią roboczą chłodziarki. W przestrzeni tej znajduje się regenerator R, który dzieli ją na dwie komory: ciepłą  $V_c$  i zimną  $V_z$ . Sumaryczna objętość komór jest stała w dowolnej fazie obiegu, tj.  $V_c + V_z = \text{const.} = V$ . Objętość każdej komory może zmieniać się od zera do  $V$ . Komora  $V_c$  znajduje się w temperaturze otoczenia ( $T_0$ );

komora  $V_z$  – w temperaturze  $T_E < T_0$ . Chłodziarka ma dwa zawory: wlotowy (4) i wylotowy (5), które sterują przepływem gazu. Sprężony gaz dopływa do komory  $V_c$ .



Rys.2.14. Odwzorowanie obiegu G-M [3]



Rys.2.15. Zasada budowy kriochłodziarki G-M: 1, 2 – tłoki; 3, 4 – zawory: wlotowy i wylotowy; 5 – napęd tłoków; R – regenerator;  $V_c$  – komora ciepła;  $V_z$  – komora zimna [3]

Obieg Gifforda-McMahona możemy rozłożyć na cztery etapy (rys. 14):

1. **Napełnianie gazem.** Tłoki są nieruchome i znajdują się w dolnym skrajnym położeniu. Komora  $V_c = V$ , komora  $V_z = 0$ . Zawór wylotowy jest zamknięty. Otwiera się zawór wlotowy. Sprężony gaz wpływa do komory  $V_c$  i miesza się z gazem pozostałym z poprzedniej fazy cyklu. Temperatura i ciśnienie gazu w komorze  $V_c$  rosną.
2. **Przetłaczanie gazu.** Zawór wlotowy jest otwarty. Tłoki przesuwają się w prawo. Objętość komory  $V_c$  maleje, a wzrasta objętość komory  $V_z$ . Gaz z komory  $V_c$  zostaje przetłoczony (przez regenerator R) do komory  $V_z$ . W regeneratorsze czynnik roboczy obniża się do temperatury  $T_f$  i gromadzi w komorze  $V_z$ . W wyniku oziębiania maleje objętość gazu. Przez otwarty zawór wlotowy do komory  $V_z$  wpływa dodatkowa porcja gazu, aby wyrównać ciśnienie w całym układzie. Kiedy tłoki osiągną prawe skrajne położenie ( $V_c = 0$ ,  $V_z = V$ ), zamyka się zawór wlotowy.



3. **Ekspansja.** Tłoki są nieruchome. Otwiera się zawór wylotowy. Gaz wypływa z komory  $V_z$  i wskutek ekspansji się oziębia. Ciśnienie w komorze spada do  $p_2$ . Zimny gaz chłodzi obiekt (przymocowany do ścianki  $V_z$ ), a następnie przepływa przez regenerator. W regeneratorsie gaz ogrzewa się, chłodząc wkład regeneratorski. Po przejściu przez regenerator gaz kierowany jest do sprężarki.
4. **Opróżnianie komory  $V_z$ .** Zawór wylotowy jest otwarty. Tłoki poruszają się w lewo. Objętość komory  $V_z$  maleje, a  $V_c$  rośnie. Zimny gaz jest usuwany z komory  $V_z$ . Kiedy tłoki osiągną lewe skrajne położenie ( $V_z = 0$ ,  $V_c = V$ ), zostaje zamknięty zawór wylotowy i obieg kończy się.

Moc chłodniczą idealnego obiegu G–M obliczamy ze wzoru:

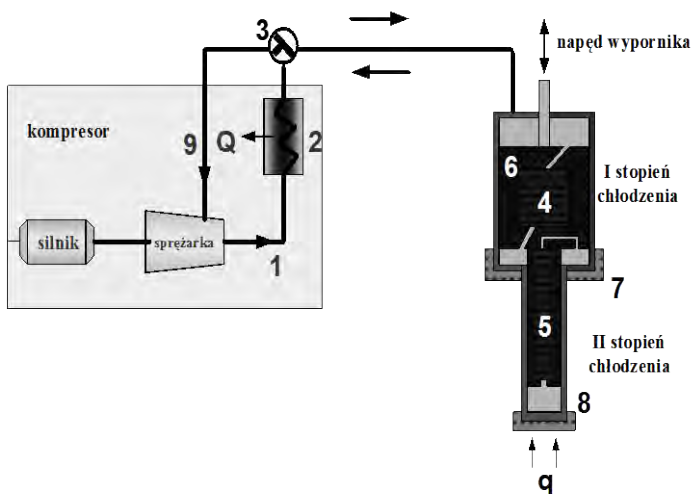
$$q = V(p_2 - p_1) \quad (2.1)$$

gdzie:

$V$  – sumaryczna objętość chłodziarki,

$p_1$  i  $p_2$  – odpowiedni ciśnienie gazu sprężonego i rozprężonego

Schemat budowy kriochłodziarki pracującej wg. cyklu Gifforda–McMahona przedstawiono na plansza 2.16.



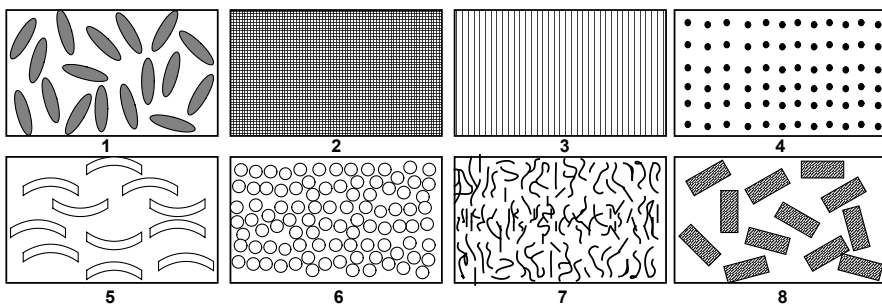
Rys. 2.16. Schemat budowy kriochłodziarki G – M: 1 – strumień gazu sprężonego; 2 – chłodziarka końcowa sprężarki; 3 – komora ciepła (przestrzeń kompresji); 4 – regenerator; 5 – komora zimna (przestrzeń ekspansji); 6 – cylinder; 7 – wypornik; 8 – zawór kontrolny; 9 – strumień gazu rozprężonego;  $q$  – ciepło odbierane od obiektu chłodzonego;  $Q$  – ciepło procesu sprężania [3]

Maszyna ta składa się ze sprężarki, głowicy chłodzącej oraz przewodów łączących. Gazem roboczym jest hel ze względu na swoje właściwości fizyczne. W głowicy chłodzącej znajduje się tłok roboczy – wypornik z umieszczonym w nim

regeneratorem. Takie umieszczenie regeneratora pozwala na lepszą regenerację ciepła. Rola regeneratora polega na akumulowaniu ciepła podczas etapu przetłaczania gazu, co ma na celu spełnienie warunków obiegu termodynamicznego. Gaz płynący w jednym kierunku ogrzewa go, a płynący w przeciwnym – chłodzi. Wkład regeneratora wykonany jest z materiałów spełniających następujące wymagania:

- duża pojemność cieplna w wymaganym obszarze temperatur,
- mała bezwładność cieplna,
- bardzo duża przewodność cieplna w kierunku promieniowym, a znikomo mała w kierunku osiowym.

Pojemność cieplna większości ciał stałych bardzo silnie maleje w niskich temperaturach, według ich charakterystycznych temperatur Debye'a. Dlatego tylko niektóre materiały nadają się na wkłady regeneratorów. Wkłady regeneratorów wykonuje się z bardzo cienkich siatek (o grubości 0,02 mm – 0,05 mm), drutów i blach, ze stali, miedzi, fosforobrazu. Regeneratory wypełniane są także kulkami, o średnicach 0,5 mm – 1,0 mm, ze stali, ołowiu i aluminium, rys. 2.17.

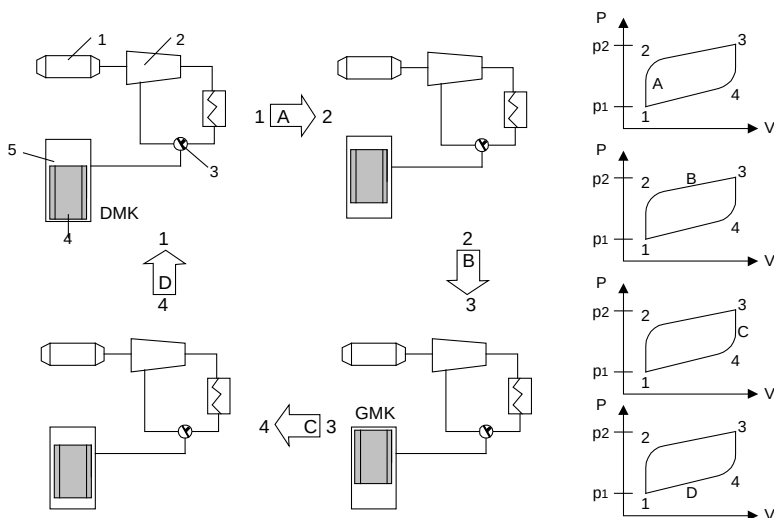


Rys.2.17. Wkłady regeneratora: 1 – metal gąbczasty; 2 – siatka metalowa; 3 – prostoliniowe rurki metalowe; 4 – pianka ceramiczna; 5 – wełna metalowa; 6 – kulki metalowe lub ceramiczne; 7 – faliste druty metalowe; 8 – skrętki z drutu metalowego [3]

Uszczelnienie tłoka zapobiega przenikaniu gazu z jednej przestrzeni do drugiej z pominięciem regeneratora, chociaż dzięki stałej sumarycznej objętości komór przepływ taki jest znikomo mały. Napęd wypornika realizowany jest za pomocą napędu mechanicznego lub pneumatycznego (hydraulicznego). W odróżnieniu od napędu mechanicznego, gdzie przyspieszanie i hamowanie wypornika realizowane jest za pomocą silnika, napęd pneumatyczny, charakteryzujący się aperiodycznym ruchem wypornika, realizowany jest w wyniku cyklicznych zmian ciśnienia gazu roboczego wpływającego i wypływającego z głowicy. Gaz roboczy sprężany jest w sprężarce, a ciepło sprężania oddawane jest do otoczenia w chłodnicy końcowej sprężarki. Jest to najczęściej chłodnica wodna, chociaż w sprężarkach małej mocy stosuje się także chłodnice powietrzne. W kriochołdziarkach G-M jako sprężarki helowe, najczęściej stosuje się sprężarki rotacyjne, charakteryzujące się prostotą budowy, łatwością obsługi oraz bardzo

dużą łatwością dopasowania do wymaganych warunków pracy, takich jak odpowiedni cykl pracy czy małe straty.

Ponieważ etap wlotu sprężonego gazu do głowicy nie jest idealnym procesem termodynamicznym, z powodu mieszania się gazu wpływającego z częścią gazu pozostałym w ciepłej przestrzeni po poprzednim cyklu, rzeczywisty cykl pracy kriochłodziarki różni się nieco od obiegu idealnego, przedstawionego na rysunku 2.14. Objawia się to zmniejszeniem masy chłodniczej chłodziarki (wzór 1), co widać na diagramie  $p - V$  w postaci zaokrąglenia jego rogów a więc zmniejszeniem jego pola powierzchni. Fazy pracy rzeczywistej kriochłodziarki G – M przedstawia rysunek 2.18.



Rys. 2.18. Fazy pracy rzeczywistej kriochłodziarki G – M oraz ich odwzorowanie na wykresie  $p - V$ : 1 – sprężarka; 2 – chłdnica; 3 – zawór kontrolny; 4 – regenerator; 5 – wypornik; DMK – dolny martwy koniec; GMK – górny martwy koniec [3]

- Faza A (1 – 2)** wlot sprężonego gazu i jego kompresja. Sprężony gaz wpływa do głowicy. Wypornik z regeneratorem zaczyna poruszać się ku górze ze swojego dolnego skrajnego położenia ( tzw. dolny martwy koniec).
- Faza B (2 – 3)** ruch wypornika ku górze, przepływ gazu ze strefy ciepłej do zimnej przez regenerator. Gaz w regeneratorze oziębia się do temperatury  $T_r$ . W zimnej przestrzeni gaz ulega mieszaniu z nowymi porcjami gazu przybywającymi ze sprężarki. Po osiągnięciu przez wypornik górnego skrajnego położenia (tzw. górny martwy koniec) objętość przestrzeni zimnej osiąga maksimum.
- Faza C (3 – 4)** rozprężanie gazu w wyniku swobodnego wypływu i powstanie efektu chłodniczego zawór kontrolny włączony jest na wylot gazu z głowicy, a wypornik rozpoczyna ruch ku dołowi. W wyniku rozprężania gazu następuje jego oziębienie. Gaz przechodząc ponownie przez regenerator

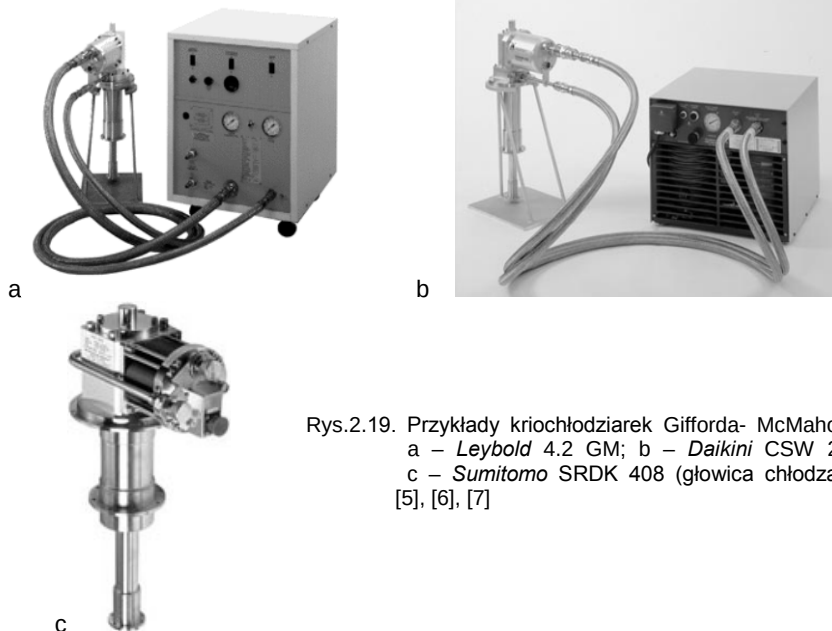
ogrzewa się do temperatury początkowej obiegu. Objętość przestrzeni zimnej maleje.

4. **Faza D ( $4 - 1$ )** ruch wypornika w dół, regeneracja gazu w regeneratorze. W fazie tej wypornik kontynuuje ruch ku dołowi. Rozprężony gaz kierowany jest do sprężarki. Objętość zimnej przestrzeni maleje do zera, gdy wypornik osiągnie swoje dolne położenie.

Fazy A i B, dotyczące wlotu sprężonego gazu przez zawór kontrolny, nazywane są cyklem wlotu gazu lub cyklem kompresji. Natomiast fazy C i D, związane z wylotem gazu, nazywane są cyklem wylotu gazu lub cyklem ekspansji.

Cykl kompresji nie jest idealnym procesem termodynamicznym ze względu na mieszanie się wpływającego, sprężonego gazu, z gazem pozostającym w ciepłej przestrzeni po poprzednim cyklu. Spowodowane jest to tym, że masa gazu w przestrzeni roboczej jest na tyle duża, że nie cały gaz zostaje przetłoczony z przestrzeni zimnej w czasie trwania jednego cyklu. Naruszenie idealnego procesu termodynamicznego powoduje obniżenie mocy chłodniczej rzeczywistej kriołodziarki, co objawia się zakrzywieniem rogów idealnego diagramu  $p - V$ . Aby ograniczyć te straty należy zapewnić odpowiednią liczbę cykli pracy kriołodziarki na jednostkę czasu. Optymalna liczba cykli kriołodziarki  $G - M$  wynosi 50 – 90 cykli/min.

Rysunek 2.19 przedstawia przykłady komercyjnych kriołodziarek, G-M, których podstawowe parametry techniczno – eksploatacyjne zamieszczono w tablicy 2.2.



Rys.2.19. Przykłady kriołodziarek Gifforda- McMahon:  
a – *Leybold* 4.2 GM; b – *Daikini* CSW 210,  
c – *Sumitomo* SRDK 408 (głowica chłodząca)  
[5], [6], [7]

Tablica 2.2. Podstawowe parametry techniczne wybranych kriochłodziarek G-M [5], [6], [7]

| Model                  | Ilość stopni chłodzenia | Zakres temperatur (minimalna osiągnięta) K | Moc chłodnicza W         | Pobór mocy kW | Orientacja głowicy | Wymiary głowicy: wys./szer. mm |
|------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|---------------|--------------------|--------------------------------|
| APD Cryogenics HS-4    | 3                       | 3,6 – 300 (około 2,5)                      | 1,0 / 4,2 K<br>1,5 / 5 K | 4,5           | pionowa            | 823 / 127                      |
| APD Cryogenics DE-208R | 2                       | 10 – 350 (8)                               | 80 / 77 K<br>7,5 / 20 K  | 4,5           | pionowa            | 466 / 114                      |
| Sumitomo SRDK 408      | 2                       | 4,2 – 300 (3,1)                            | 1,0 / 4,2 K<br>34 / 40 K | 7,7           | dowolna            | 557 / 180                      |
| Sumitomo SRDK 415      | 2                       | 4,2 – 300 (4,2)                            | 1,5 / 4,2 K<br>35 / 50 K | 2,5           | dowolna            | 557 / 180                      |
| Leybold 4.2 GM         | 2                       | 4,2 – 300 (3,4)                            | 0,5 / 4,2 K<br>50 / 50 K | 6,5           | pionowa            | 630 / 176                      |
| Daikini CSW 210        | 2                       | 3,2 – 300 (3,0)                            | 0,8 / 4,2<br>35 / 41 K   | 6,7           | ———                | ———                            |

### 2.3.3. Podsumowanie wiadomości o kriochłodziarkach mechanicznych.

Kriochłodziarki Stirlinga charakteryzuje się stosunkowo dużą sprawnością termodynamiczną. Temperatura pracy uzyskiwana za pomocą tych chłodziarek waha się od 15 – 30 K. Uzyskanie niższej temperatury pracy jest ograniczone ze względu na sposób realizacji obiegu termodynamicznego. Kriochłodziarki te mają ograniczoną możliwość miniaturyzacji ze względu na określoną, konieczną, objętość przestrzeni kompresji oraz konieczności umieszczenia w obudowie chłodziarki napędu tłoków. Pomimo tych zastrzeżeń kriochłodziarki Stirlinga są szeroko stosowane w układach chłodzenia niewymagających zbyt niskich temperatur pracy oraz gdzie gabaryty urządzenia nie grają roli.

Stosując kriochłodziarki Gifforda – McMahona można uzyskać temperaturę pracy rzędu 4,2 – 300 K. Uzyskanie tak niskiej temperatury nie jest możliwe w chłodziarkach Stirlinga. Moc chłodnicza kriochłodziarek G – M waha się w granicach 0,5 - 1,5 W na poziomie temperatur helowych (4,2 K) i 30 – 45 W na poziomie temperatur azotowych (77 K). Kriochłodziarki te charakteryzują się ponadto prostszą budową oraz możliwością miniaturyzacji. W tablicy 2.3 przedstawiono zestawienie wybranych parametrów techniczno – eksploatacyjnych kriochłodziarek Stirlinga i Gifforda – McMahona.

Tablica 2.3. Zestawienie parametrów kriochłodziarek Sterlinga i Gifforda – McMahon

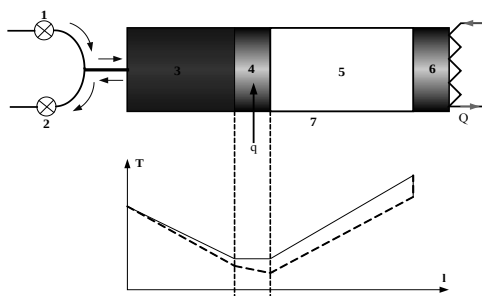
| Parametr                            |         | Stirling          | Gifford - McMahon                   |
|-------------------------------------|---------|-------------------|-------------------------------------|
| Zakres temperatur pracy             | K       | 20 – 300          | 4,2 – 300                           |
| Minimalna temperatura pracy         | K       | 10                | 3,2                                 |
| Moc chłodnicza                      | W       | 1,0 – 60 / 20 K   | 0,5 – 2,0 @ 4,2 K<br>30 – 50 @ 40 K |
| Pobór mocy                          | kW      | 0,5 – 2           | 3 – 8                               |
| Ilość stopni chłodzenia             |         | 1– 2              | 1 – 3                               |
| Gabaryty / Możliwość miniaturyzacji |         | niewielkie / duża | niewielkie / b. duża                |
| Prostota budowy i użytkowania       |         | +++               | ++++                                |
| Orientacja głowicy podczas pracy:   | pionowa | +                 | +                                   |
|                                     | pozioma | –                 | +                                   |
| Nieprzerwany czas pracy             | h       | > 20000           | >20000                              |

## 2.4. Rury pulsacyjne – „pulse tube”.

Innym typem chłodziarek kriogenicznych, pracujących na zasadzie realizacji cykli termodynamicznych są tzw. rury pulsacyjne – „pulse tube”. Do osiągnięcia niskiej temperatury w rurze wykorzystuje się dwa procesy nierównowagowe [3]:

- napełnianie zbiornika gazem,
- opróżnianie zbiornika z gazu w procesie swobodnego wypływu.

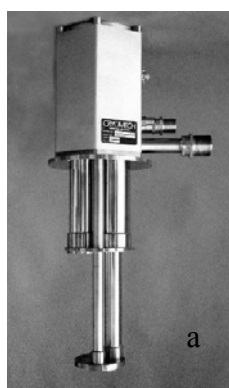
Podczas napełniania zbiornika czynnikiem roboczym i podczas wypływu w rurze powstaje gradient temperatury, dzięki czemu powstają warunki do uzyskania niskich temperatur. Schemat chłodziarki oraz rozkład temperatury na jej długości przedstawiono na rysunku 2.20.



Rys. 2.20. Schemat rury pulsacyjnej i rozkład temperatury na jej długości: 1, 2 – zawory: wlotowy i wylotowy; 3 – regenerator; 4 – wymiennik ciepła; 5 – komora robocza; 6 – chłodnica; 7 – cylinder; q – ciepło odbierane od obiektu chłodzonego

Chłodziarka składa się z regeneratora (3), wymiennika ciepła (4), komory roboczej (5), chłodnicy (6) i zaworów: wlotowego (1) i wylotowego (2). Po otwarciu zaworu wlotowego gaz wypełnia regenerator, w którym oziębia się do temperatury T. Po przejściu przez regenerator gaz wpływa do wymiennika ciepła i komory roboczej. Podczas napełniania następuje nierównomierne sprężanie gazu i powstaje gradient temperatury. Najniższą temperaturę ma gaz znajdujący się w chłodnicy, najwyższą – w pobliżu zaworów. Proces napełniania należy prowadzić z taką szybkością, aby nie następowało wymieszanie gazu. Po napełnieniu następuje przerwa w dopływie gazu, podczas której od gazu zostaje odebrane (w chłodnicy) ciepło Q. Teraz otwiera się zawór wylotowy. Następuje swobodny wypływ gazu z komory roboczej i chłodnicy, czemu towarzyszy spadek jego ciśnienia i temperatury, a tym samym zachodzi efekt chłodniczy.

Rury pulsacyjne swoją konstrukcją przypominają kriochłodziarki Gifforda – McMahona. Komorę roboczą wykonuje się z cienkościennej rurki ze stali nierdzewnej lub nowego srebra; regenerator ma kształt cylindra wypełnionego dyskami z siatki fosforobrazowej. Wymiennik ciepła jest wyposażony w kanały „prostujące” strumień gazu. Zakres maksymalnych ciśnień roboczych wynosi 2,0 – 2,5 MPa. Gazem roboczym jest przeważnie hel. Rysunek 2.21 przedstawia przykłady komercyjnych rur pulsacyjnych, których parametry techniczno – eksploatacyjne zamieszczono w tablicy 2.4.



Rys.2.21. Rury pulsacyjne produkcji Cryomech Ltd a) oraz Sumitomo Electric b) [7], [8]

Tablica 2.4. Parametry techniczno – eksploatacyjne rury pulsacyjnej Cryomech [8]

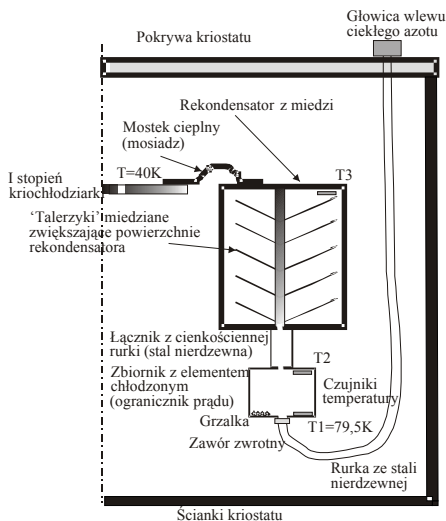
| Parametry głowicy chłodzącej      |               |                       |
|-----------------------------------|---------------|-----------------------|
| Model (liczba stopni chłodzenia)  | AL325 (2)     | PT405 (2)             |
| Moc cieplna: pierwszy stopień     | 125 W @ 30 K  | 25 W @ 65 K           |
| drugi stopień                     | 60 W @ 20 K   | 0,5 W @ 4.2 K         |
| Minimalna temperatura pracy       | 15 K          | 2,8 K                 |
| Czas uzyskania dolnej temperatury | 30 min (20 K) | 60 min (do 4.2 K)     |
| Masa                              | 18,6 kg       | 14 kg                 |
| Parametry kompresora              |               |                       |
| Masa                              | -             | 102 kg                |
| Wymiary                           | -             | 58 cm x 53 cm x 66 cm |
| Pobór mocy                        | 10,5 kW       | 5 kW                  |

## 2.5. Chłodzenie urządzeń nadprzewodnikowych techniką w kąpieli ze wspomaganiem.

Wadą chłodzenia kontaktowego jest ograniczona efektywność chłodzenia i mała bezwładność cieplna. Wadą chłodzenia w kąpieli jest konieczność częstego uzupełniania cieczy kriogenicznej, co wymaga stałej obsługi. Zastosowanie chłodzenia w kąpieli ze wspomaganiem, gdzie uzwojenie zanurzone jest w cieczy kriogenicznej, a kriołodziarka odbiera ciepło od tej cieczy, łączy podstawowe zalety chłodzenia w kąpieli, zwielokrotniając czas pomiędzy kolejnymi uzupełnieniami cieczy kriogenicznych.

W chłodzeniu urządzeń nadprzewodnikowych techniką w kąpieli ciekłego azotu ze wspomaganiem kriołodziarką temperaturę pracy urządzenia można regulować poprzez zmianę temperatury ciekłego azotu. Zakres zmian temperatury jest ograniczony do przedziału pomiędzy temperaturą zestalania azotu ok. 64 K a temperaturą wrzenia azotu 77 K.

W układach chłodzenia wykorzystujących technikę w kąpieli ze wspomaganiem kriołodziarką mechaniczną, w celu wydłużenia czasu pomiędzy uzupełnianiem czynnika chłodzącego, można także wykorzystywać układ rekondensacji. Idea pracy takiego układu oparta jest na możliwości rekondensacji gazu (azotu) po odparowaniu jego ciekłej fazy wskutek przejścia elementu nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego. Azot w postaci gazowej, po zetknięciu z chłodnymi ściankami rekondensatora chłodzonego kriołodziarką, skrapla się i spływa do naczynia z elementem nadprzewodnikowym, chłodząc go do temperatury 77 K (poniżej wartości  $T_c$ ). Pracę takiego układu chłodzenia ilustruje rysunek 2.22.



Rys.2.22 Schemat układu eksperymentalnego z rekondensatorem i kriołodziarką w układzie chłodzenia



Naczynie miedziane (rekondensatora) połączono mostkiem cieplnym z 1-wszym stopniem głowicy chłodzącej kriochłodziarki, obniżając jego temperaturę do 40 K. Naczynie to połączone jest hermetycznie z drugim (mniejszym) w którym umieszczone są czujniki poziomu ciekłego azotu oraz grzejnik imitujący pracę elementu nadprzewodnikowego. Podgrzanie naczynia rekondensatora powoduje skroplenie azotu i spłynięcie do kriostatu urządzenia nadprzewodnikowego.

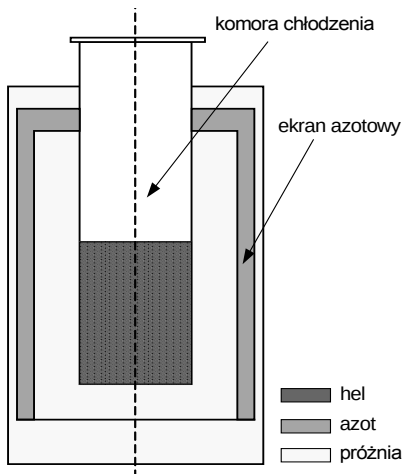
## **2.6. Chłodzenie urządzeń nadprzewodnikowych techniką wymuszoną.**

Chłodzenie wymuszone można realizować poprzez przepływ ciekłego czy gazowego helu, wodoru lub azotu w kanałach chłodzących wewnątrz urządzenia i po jego powierzchni, w rurkach umieszczonych wewnątrz urządzenia bądź w rurkach nawiniętych na urządzeniu. Wymiana ciepła pomiędzy czynnikiem chłodzącym a ścianką rurki, w której ten czynnik przepływa odbywa się na drodze konwekcji wymuszonej. Możliwość zmiany współczynnika przejmowania ciepła przez zwiększenie prędkości przepływu cieczy kriogenicznej jest główną zaletą tej techniki chłodzenie w porównaniu z chłodzeniem w kąpeli. Przepływ ciepła z urządzenia do rurek chłodzących odbywa się na drodze przewodnictwa cieplnego. W urządzeniu stosowane są często mostki cieplne odprowadzające ciepło z wnętrza urządzenia do rurek chłodzących. Wadą chłodzenia wymuszonego, w porównaniu z chłodzeniem techniką w kąpeli, jest konieczność stosowania dużych prędkości przepływu lub też dopuszczanie dużych różnic temperatury w urządzeniu. W przypadku występowania dużych strat cieplnych w urządzeniu lub małych hydraulicznych średnic przepływu powstają duże różnice ciśnień i znaczne różnice temperatury w urządzeniu oraz konieczny jest duży wydatek mocy na pompowanie czynnika chłodzącego [9].

## **2.7. Kriostaty urządzeń nadprzewodnikowych.**

Kriostatem nazywamy konstrukcję przeznaczoną do utrzymywania urządzeń lub elementów nadprzewodnikowych w temperaturach kriogenicznych. Źródłem niskiej temperatury, klasycznych kriostatów stosowanych przy chłodzeniu w kąpeli, są cieczy kriogeniczne, takie jak ciekły hel, wodór, azot i inne. Zmniejszając ciśnienie pary nad wlaną do kriostatu cieczą, poczynając od ciśnienia atmosferycznego, można obniżyć temperaturę krytyczną cieczy kriogenicznej. Istnieje wiele konstrukcji i rozwiązań kriostatów, jednak najbardziej rozpowszechnione, przystosowane do chłodzenia w kąpeli, są kriostaty helowe i azotowe [9], [10].

Przy budowie kriostatu najważniejszym zadaniem jest wykonanie odpowiedniej izolacji termicznej przestrzeni chłodzenia. Dla kriostatów helowych dobre rezultaty daje wysokopróżniowa izolacja termiczna, oparta o szeroko rozpowszechnionym naczyniu Dewara. Dodatkowo, w celu zmniejszenia strumienia cieplnego przedostającego się do kriostatu na drodze przewodzenia i promieniowania, stosuje się ekrany azotowe obniżające temperaturę zewnętrznych ścian kriostatu oraz stosuje się wielowarstwowe izolacje proszkowo – próżniowe lub superizolacje. Schemat kriostatu helowego z ekranami azotowymi przedstawia rysunek 2.23.



Rys.2.23. Schemat kriostatu helowego z ekranem azotowym

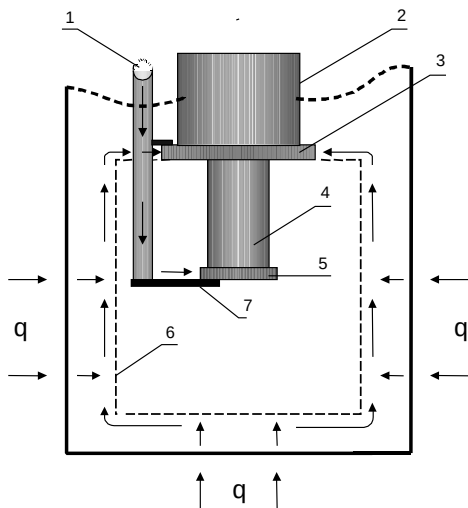
Stosowanie kriostatów helowych i azotowych wiąże się z częściową utratą cieczy kriogenicznych na skutek parowania, a więc koniecznością ich uzupełniania.

Zastosowanie kriochłodziarek mechanicznych, w połączeniu z kriostatami próżniowymi wykonanymi z stali nierdzewnej, pozwoliło na wyeliminowanie tego problemu. W górnej części kriostatu znajdują się gniazda przyrządów pomiarowych i aparatury próżniowej oraz gniazdo głowicy chłodziarki mechanicznej. Zmniejszenie do minimum przenikania ciepła do kriostatu, zarówno z zewnątrz jak i z wewnętrznych jego źródeł (np. przepusty prądowe), jest niezwykle ważne ze względu na niewielką moc chłodziarki mechanicznej. Przenikanie ciepła do wnętrza kriostatu następuje na drodze przewodnictwa oraz promieniowania cieplnego. Stal nierdzewna, z której wykonany jest kriostat, o współczynniku promieniowania cieplnego ( $\epsilon = 1$ ), prawie całkowicie eliminuje przenikanie ciepła na drodze promieniowania.

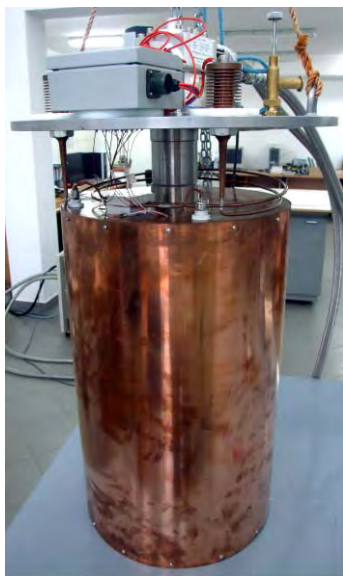
Izolację termiczną w opisywanych kriostatach stanowi wysoka próżnia rzędu  $10^{-6}$  Pa. Jest to zabezpieczenie wystarczające, ponieważ w zasadzie całkowicie eliminuje dopływ ciepła na drodze przewodnictwa i konwekcji przez pozostały gaz szczątkowy. Izolacja ta ma najmniejszą pojemność cieplną, a przewodzony strumień ciepła jest niezależny od grubości warstwy izolacyjnej. Współczynnik przewodności próżni  $\lambda$  wynosi  $5 \cdot 10^{-4}$  W/(m·K). W celu polepszenia warunków odprowadzania ciepła do głowicy chłodzącej kriochłodziarki, wewnątrz kriostatu umieszczony jest ekran radiacyjny „przechwytyjący” ciepło przenikające do wnętrza kriostatu na drodze przewodnictwa i promieniowania, rysunek 2.24. Ekran taki połączony jest bezpośrednio z pierwszym stopniem głowicy chłodzącej, co pozwala na bezpośrednie odprowadzenie zgromadzonych na nim ładunków ciepłych do kriochłodziarki. W celu zoptymalizowania tego procesu, jest on wykonany z miedzi jako materiału o doskonałej przewodności cieplnej w temperaturach kriogenicznych.

Również przekazywanie ładunków ciepłych z przepustów prądowych do głowicy następuje za pośrednictwem ekranu. Rysunek 2.25 przedstawia przykład

ekranu radiacyjnego, elektromagnesu nadprzewodnikowego zasobnika energii, zrealizowanego w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych.

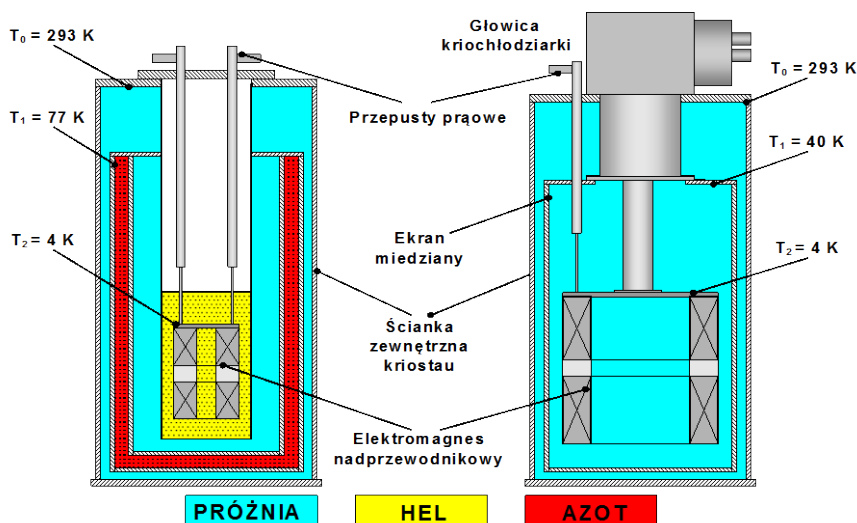


Rys.2.24. Schemat przenikania ciepła do wnętrza kriostatu, oraz rola ekranu radiacyjnego: 1 – przepust prądowy; 2 – pierwszy stopień głowicy; 3 – zimny koniec pierwszego stopnia; 4 – drugi stopień głowicy; 5 – zimny koniec drugiego stopnia; 6 – ekran radiacyjny; 7 – mostek cieplny. Strzałkami zaznaczono przepływ ładunków cieplnych  $q$  w ekranie i przepuszcie



Rys.2.25. Ekran radiacyjny, elektromagnesu nadprzewodnikowego zasobnika energii, zrealizowanego w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych

Rysunek 2.26 przedstawia różnice konstrukcyjne pomiędzy kriostatami helowymi a kriostatami przystosowanymi do współpracy z kriochłodziarkami mechanicznymi.



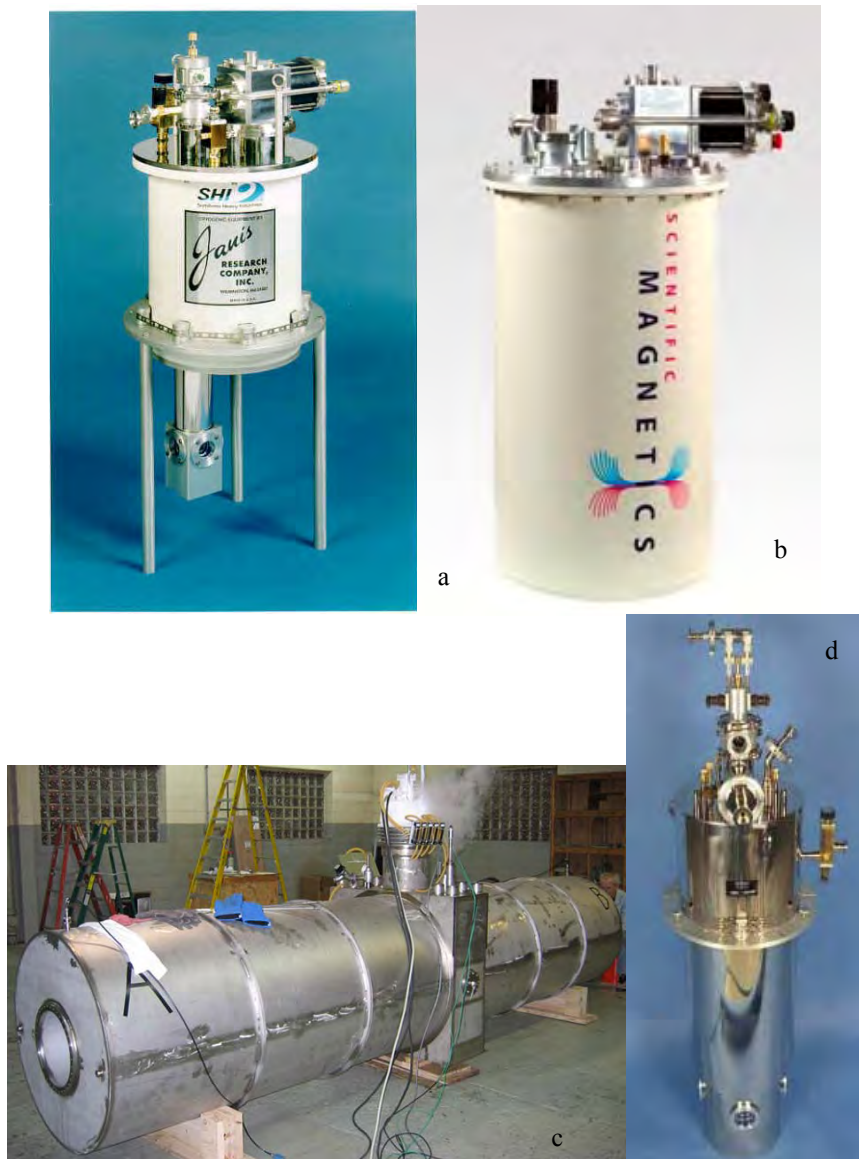
Rys. 2.26. Różnice konstrukcyjne kriostratów helowych i przystosowanych do współpracy z kriołodziarkami mechanicznymi

Rysunek 2.27 przedstawia kriostrat próżniowy elektromagnesu nadprzewodnikowego zasobnika energii (rys 2.8b), przystosowany do współpracy z kriołodziarką mechaniczną Sumitomo SRDK408, wykonany według projektu Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych



Rys.2.27. Kriostrat próżniowy przystosowany do współpracy z kriołodziarką mechaniczną

Na rysunku 2.28 przedstawiono przykłady kriostatów przystosowanych do współpracy z kriochłodziarkami kontaktowymi oraz klasyczne kriostaty helowe.



Rys. 2.28. Kriostaty: a i b - przystosowane do współpracy z kriochłodziarką mechaniczną; c – przemysłowy kriostat azotowy; d – laboratoryjny kriostat helowy [6], [11]

### 2.7.1. Izolacja termiczna kriostatów urządzeń nadprzewodnikowych

Ograniczenie dopływu ciepła przez ścianki kriostatu wymaga aby wyposażone one były w odpowiednią izolację cieplną. Wprawdzie istnieje prosta metoda zmniejszenia przepływu ciepła przez zastosowanie grubszej izolacji, ale tego rodzaju rozwiązanie z wielu względów jest niewygodne (masa, rozmiary). Zostaje, więc tylko spełnienie wymogu izolacji doskonałej, tj. izolacji charakteryzującej się możliwie najmniejszym współczynnikiem przewodności cieplnej  $\lambda$ . Obecnie w kriogenice stosuje się trzy podstawowe rodzaje izolacji termicznych [3]:

- próżniową
- proszkowo – próżniową
- wielowarstwową próżniową (superizolacja)

#### ***Izolacja próżniowa***

Próżnia rzędu  $10^{-2}$  Pa wytworzona między dwiema ściankami w zasadzie całkowicie eliminuje dopływ ciepła na drodze przewodnictwa i konwekcji przez pozostały jeszcze gaz. Przy jednoczesnym zmniejszeniu do minimum przekazywania ciepła przez promieniowanie, izolacja próżniowa jest najbardziej efektywna ze wszystkich typów izolacji termicznych. Można to uzyskać przez np. wypolerowanie lub posrebrzenie stalowych ścianek kriostatu w celu zmniejszenia współczynnika emisji  $\epsilon$ ,

Izolacja ta ma najmniejszą pojemność cieplną i najmniejszą masę, a przewodzony strumień ciepła jest niezależny od grubości warstwy izolacyjnej. Jednak w temperaturze otoczenia (około 300 K) oraz dolnym zakresie temperatur kriogenicznych (około 4,2 K) jej skuteczność jest niewystarczająca. Skuteczność izolacji próżniowej można znacznie zwiększyć poprzez wprowadzenie dodatkowej warstwy ciekłego azotu lub poprzez zastosowanie izolacji proszkowo-próżniowej lub superizolacji.

#### ***Izolacja proszkowo – próżniowa***

Izolacja proszkowo – próżniowa polega na wypełnieniu przestrzeni izolacyjnej materiałami sproszkowanymi o możliwie najmniejszej przewodności cieplnej i wytworzeniu próżni rzędu  $10^{-2}$  Pa. Stosowane są proszki z różnych materiałów, jak tlenek glinu, ziemia okrzemkowa, krzemian wapniowy, perlit i inne.

W przepływie ciepła przez izolację decydującą rolę odgrywa przewodzenie przez cząsteczki proszku i przez promieniowanie. Promieniowanie można znacznie ograniczyć (3 – 6 krotnie) przez dodanie proszku metalowego (aluminium, miedź, nikiel) w ilości około 50% całkowitej masy proszku.

#### ***Wielowarstwowa próżniowa (superizolacja)***

Izolacja wielowarstwowa próżniowa, o próżni rzędu  $10^{-2}$  Pa, składa się z wielu na przemian leżących warstw folii metalowych, o możliwie najmniejszych wartościach współczynnika emisji oraz warstw materiałów o minimalnym współczynnikiem przewodzenia ciepła.

Doskonale nadaje się folia aluminiowa, jak również metalizowane błony z mas plastycznych. Poprzekładane są one cienkimi warstwami włókien

mineralnych o grubości mniejszej od jednego mikrometra, bardzo drobnoziarnistym proszkiem lub papierem szklanym. Bardzo dobre wyniki otrzymuje się stosując warstwy folii aluminiowej o grubości 0,006 mm – 0,013 mm i papier szklany o grubości 0,12 mm – 0,20 mm. Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła tego rodzaju izolacji jest ponad 10 krotnie mniejszy od współczynnika przewodzenia izolacji proszkowo – próżniowej, dlatego tego rodzaju izolacje nazywa się superizolacjami.

## **2.8. Podsumowanie.**

Przy obecnym stanie wiedzy i techniki, zastosowanie układów chłodzenia na bazie kriochłodziarek mechanicznych, wydaje się jedynym rozwiązaniem pozwalającym na osiągnięcie zamierzonych parametrów i warunków pracy urządzeń nadprzewodnikowych. Chłodziarki te są przy tym proste w obsłudze, mają niewielkie gabaryty i zwartą budowę oraz są ekonomiczne w eksploatacji. Zastosowanie kontaktowych układów chłodzenia pozwala także na znaczne uproszczenie budowy i eksploatacji innych elementów systemu urządzeń nadprzewodnikowych, zwłaszcza kriostatu i układu zasilania. Wciąż prowadzone są prace mające na celu zmodernizowanie tych urządzeń, aby możliwe było osiągnięcie większych mocy chłodniczych.

## **2.9. Literatura**

- [1] Jha A., R., *Superconductor Technology: Application to microwave, electro-optics, electrical machines and propulsion systems*, John Willey & Sons, Inc.1998.
- [2] Chorowski M., *Kriogenika, podstawy i zastosowanie*, IPPU MASTA, ISBN 978-83-921555-3-9, 2007
- [3] Bodio E., *Skraplarki i chłodziarki kriogeniczne*, Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 1987.
- [4] Materiały informacyjne producenta: Sterling Cryogenics&Refrigerators BV
- [5] Materiały informacyjne producent: Leybold Ltd.
- [6] Materiały informacyjne producent: Janis Research Company, Inc.
- [7] Materiały informacyjne producent: Sumitomo Electric Inc.
- [8] Materiały informacyjne producent: Cryomech Ltd.
- [9] Kozak S., *Modelowanie elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych*, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 221, 2005.
- [10] Janiczek S., *Podstawy krioelktrotechniki*, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1993.
- [11] Materiały informacyjne producent: American Magnetics

## 3. URZĄDZENIA NADPRZEWODNIKOWE W ELEKTROENERGETYCE

### 3.1. Wprowadzenie

Udoskonalenie technologii wytwarzania nadprzewodników niskotemperaturowych II rodzaju oraz nadprzewodników wysokotemperaturowych o dobrych parametrach w silnych polach magnetycznych, stworzyło warunki do wykorzystania ich w elektroenergetyce. Spośród silnoprządowych urządzeń nadprzewodnikowych najbardziej zaawansowane technologicznie i aplikacyjnie są nadprzewodnikowe ograniczniki prądu oraz nadprzewodnikowe zasobniki energii.

Szczególne właściwości nadprzewodników umożliwiają budowę urządzeń elektrycznych o parametrach nieosiągalnych przy stosowaniu materiałów konwencjonalnych. Właściwość gwałtownego (skokowego) wzrostu rezystancji elementu nadprzewodnikowego przy przekroczeniu jego wartości krytycznej prądu umożliwia budowę ograniczników prądów zwarciovych w sieciach elektroenergetycznych.

Zwarcia awaryjne w sieciach elektroenergetycznych są dużym zagrożeniem dla transformatorów, generatorów, szyn zbiorczych i linii przesyłowych oraz zmniejszają pewność dostarczania energii odbiorcom. Ograniczanie prądów zwarcia za pomocą dławików i odpowiednio dużej reaktanji transformatorów znacznie wpływa na wzrost kosztów budowy i eksploatacji systemu elektroenergetycznego, a więc i na cenę energii elektrycznej.

Idea budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądowych powstała ponad 20 lat temu, jednak warunki do jej realizacji powstały przed kilku laty, kiedy to wytworzono wysokotemperaturowe elementy nadprzewodnikowe oraz kontaktowe układy chłodzenia (z ang.: cryocooler). W kilku laboratoriach na świecie prowadzone są intensywne badania i powstają pierwsze oferty dostawy nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

Istnieją dwa zasadnicze rodzaje rozwiązań nadprzewodnikowych ograniczników prądu: rezystancyjne i indukcyjne. Ograniczniki rezystancyjne są proste w swej konstrukcji, jednak wymagają doprowadzenia prądu roboczego do elementu nadprzewodnikowego za pomocą przepustów prądowych. Bezpośredni dostęp do gałęzi z elementem nadprzewodnikowym ułatwia badania eksperymentalne stanów przejściowych ogranicznika. W ogranicznikach indukcyjnych elementem nadprzewodnikowym jest pierścień stanowiący zwarte uzwojenie wtórne transformatora o konwencjonalnym, zaprojektowanym na prąd znamionowy sieci, uzwojeniu pierwotnym. W uzwojeniu pierwotnym generują się pewne straty mocy, ale układ nie wymaga przepustów prądowych i koszty chłodzenia są niskie.

Budowa i badanie modeli fizycznych tych dwóch rodzajów nadprzewodnikowych ograniczników prądu stały się podstawą realizacji badań w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, która od wielu lat współpracuje z Instytutem Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej.



Drugim urządzeniem nadprzewodnikowym dla elektroenergetyki, które jest obiektem badań prowadzonych w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych jest nadprzewodnikowy zasobnik energii.

Pierwsze pomysły gromadzenia energii elektrycznej w polu magnetycznym cewki powstały już ponad 100 lat temu, natomiast wykorzystanie materiałów nadprzewodnikowych do tego rodzaju urządzeń zaproponowane było w 1960 roku. Pierwsze urządzenia tego typu miały gromadzić energię elektryczną co najmniej 5000 MWh. Idea ta była realizowana poprzez budowę solenoidalnych cewek o średnicy 1 kilometra. Umieszczane były pod powierzchnią ziemi. Cewki te miały mieć rozmiary większe niż jakiegokolwiek urządzenia nadprzewodnikowe budowane i projektowane w tym czasie, dlatego podejmowano się wtedy jedynie przygotowań koncepcji i ewentualnie wykonania kosztorysu takiego urządzenia.

Dopiero w roku 1980 zakłady przemysłowe zauważyły korzyści płynące z zastosowania urządzeń SMES i aktywnie włączyły się do działań prowadzących do ulepszania tych urządzeń. W roku 1987 Departament Obrony Stanów Zjednoczonych zdecydował o rozpoczęciu prac nad nadprzewodnikowym zasobnikiem energii o energii 20 MWh. System ten miał pracować jako urządzenie zasilające w laserze nad którym prowadzono badania. Obecnie SMES'y postrzegane są głównie jako urządzenia wspomagające sterowanie przemysłowymi układami energetycznymi. Niezawodność i wysoka jakość dostarczanej energii ma kluczowe znaczenie dla przemysłu.

### **3.2. Analiza działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu**

Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zabezpiecza chroniony obwód, przed skutkami termicznymi i dynamicznymi przepływu prądu awaryjnego, wprowadzając do niego dużą impedancję w chwili przekroczenia dopuszczalnej, bezpiecznej, wartości prądu w obwodzie [4], [6], [7]. Czas zadziałania ogranicznika nadprzewodnikowego jest niemal natychmiastowy, amplituda prądu awaryjnego nie osiąga pierwszego, najniebezpieczniejszego, maksimum. Po zaniku prądu awaryjnego ogranicznik szybko powraca do pierwotnego stanu charakteryzującego się znikomo małą impedancją.

Analizę pracy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu wygodnie jest prowadzić na podstawie jego schematu zastępczego [1], [3]. Podejście takie umożliwia także opracowanie modelu matematycznego i przeprowadzenie symulacji komputerowej skuteczności ograniczania prądu awaryjnego.

#### **3.2.1. Stany pracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu**

Sekwencyjny model pracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu, wymaga przy budowaniu schematów zastępczych i modeli matematycznych, opisanie poszczególnych stanów pracy [7]. W pojedynczym cyklu pracy ogranicznika określić można cztery stany pracy, jak pokazano na rysunku 1.1.

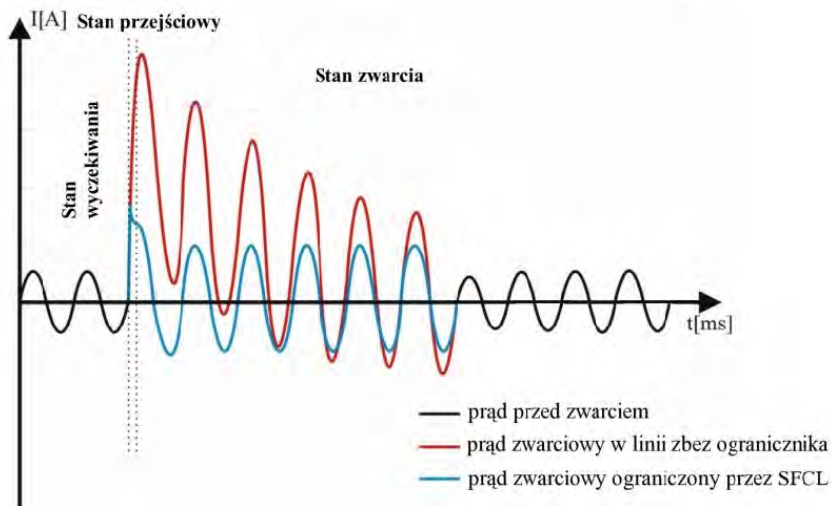
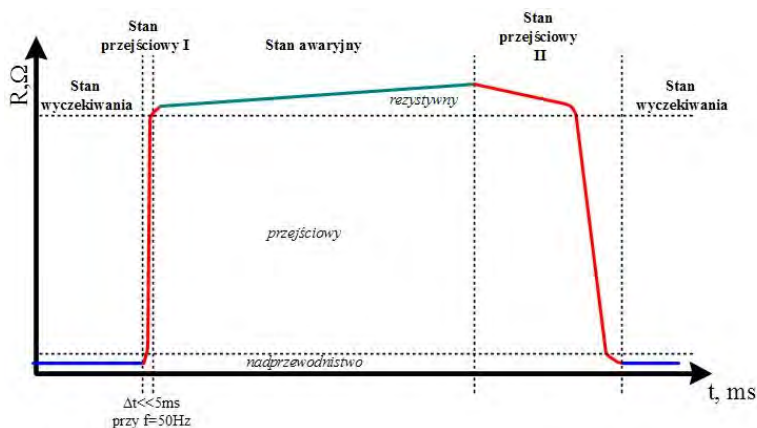
##### **a) Stan wyczekiwania**

Element nadprzewodzący znajduje się w stanie nadprzewodzenia, impedancja ogranicznika jest znikomo mała w porównaniu do impedancji

pozostałych elementów pracujących w chronionym obwodzie. Wpływ ogranicznika na wartość prądu można przyjąć za pomijalnie mały.

### b) Stan przejściowy I – wyjście z nadprzewodnictwa

Wzrost wartości prądu w chronionym obwodzie, ponad wartość dopuszczalną, powoduje „skokową” zmianę impedancji ogranicznika. Impulsem do wzrostu impedancji jest przekroczenie granicznej wartości prądu, związanej z krytyczną wartością prądu elementu nadprzewodnikowego ogranicznika. Dynamika procesu przejściowego uzależniona jest od typu i konstrukcji ogranicznika. Do opracowywania modelu numerycznego można z wystarczającym przybliżeniem przyjąć, że proces ten jest skokowy.



Rys. 3.2.1. Stany pracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu

### c) Stan awaryjny - ograniczania

Działanie elementu nadprzewodnikowego w stanie rezystywnym powoduje że impedancja ogranicznika jest maksymalna. Występujący nieznaczny wzrost impedancji związany jest z temperaturową zależnością rezystancji poszczególnych elementów ogranicznika. Czas trwania stanu ograniczania uzależniony jest od szybkości zadziałania aparatury łączeniowej.

### d) Stan przejściowy II – powrót do nadprzewodnictwa

Stan przejściowy drugi może zachodzić dwoma „drogami”. W warunkach bezprądowych, czas przejścia jest funkcją temperaturowego przejścia elementu nadprzewodnikowego ogranicznika do stanu nadprzewodzenia. W większości przypadków można przyjąć skokowy charakter przejścia. W warunkach obciążenia prądowego przejście do stanu nadprzewodzącego odbywa się przy przepływie prądu o wartości niższej od krytycznej. Powoduje to że wyjście z stanu rezystywnego elementu nadprzewodzącego ogranicznika ma przebieg łagodniejszy niż w stanie bezprądowym. Pierwszy sposób przejścia zachodzi w ogranicznikach pracujących w sieciach elektroenergetycznych, drugi sposób zachodzi w laboratoryjnych modelach ograniczników, gdzie prąd awaryjny jest generowany i sterowany.

Szczegółowy opis poszczególnych stanów pracy dla różnych typów ograniczników nadprzewodnikowych (rezystancyjnych, indukcyjnych i hybrydowych) różni się, co wynika z różnic w zasadzie działania.

### 3.2.2. Schematy zastępcze nadprzewodnikowych ograniczników prądu

Analizę działania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu najwygodniej prowadzić korzystając z jego schematu zastępczego [7]. Ponadto schemat zastępczy umożliwia rozpatrzenie współpracy ogranicznika z innymi urządzeniami i siecią elektroenergetyczną.

Wspólnym mianownikiem schematów zastępczych i modeli matematycznych, wszystkich typów ograniczników nadprzewodnikowych, jest model matematyczny elementu nadprzewodnikowego, opisany równaniem (3.2.1) i pokazano na rysunku 3.2.2.

$$R_n(t) = \frac{R_{n\_max}}{e^{\frac{I_c(T) - i_n(t)}{d_n}} + 1} \quad (3.2.1)$$

gdzie:

$R_{n\_max}$  jest rezystancją elementu nadprzewodnikowego w stanie rezystywnym,  
 $I_c(T)$  jest wartością krytyczną prądu elementu nadprzewodnikowego w funkcji temperatury tego elementu,

$i_n(t)$  jest wartością chwilową prądu płynącego przez element nadprzewodnikowy ogranicznika,

$d_n$  jest pochodną prądu płynącego przez nadprzewodnik.

Wartości parametrów krytycznych elementu nadprzewodnikowego są ze sobą powiązane i wspólnie definiują powierzchnię nadprzewodnictwa

rozgraniczającą stan nadprzewodzenia od stanu rezystywnego, jak pokazano na rysunku 1.2. W modelu matematycznym powiązane są ze sobą krytyczna wartość prądu elementu nadprzewodnikowego [ $I_c$ ] od temperatury tego elementu [ $T$ ], zgodnie z równaniem (2).

$$I_c = I_{c_0} \left( 1 - \left( \frac{T + \Delta T}{T_C} \right)^2 \right) \quad (3.2.2)$$

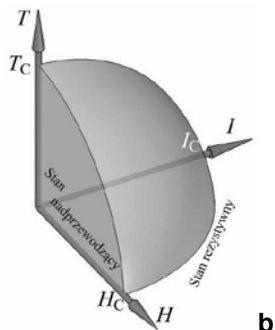
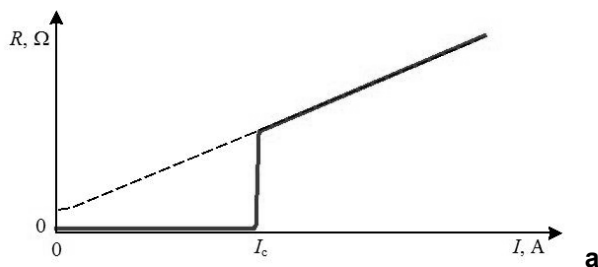
Wzrost temperatury elementu nadprzewodnikowego [ $\Delta T$ ] wywołany jest przepływem prądu [ $I$ ] przez ten element, co opisuje równanie 1.3.

$$\Delta T = \frac{R_n(t) \cdot \int_{t-\Delta t}^t i_n(t) dt - P_{krio} \cdot \Delta t}{C_w \cdot m} \quad (3.2.3)$$

gdzie:

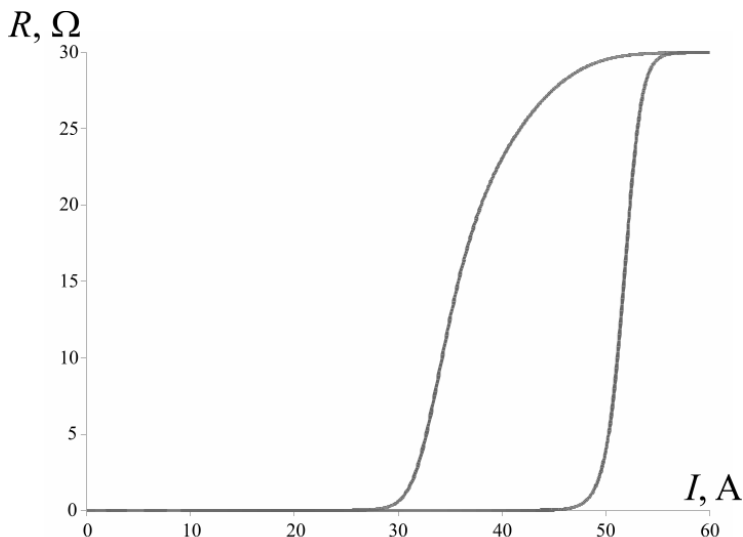
$P_{krio}$  – moc cieplna układu kriogenicznego

$\Delta t$  – długość kroku czasowego obliczeń



Rys. 3.2.2. Zależność rezystancji nadprzewodnika i przewodnika w funkcji prądu(a) oraz powierzchnia krytyczna nadprzewodnictwa (b).

Zaproponowany opis matematyczny elementu nadprzewodnikowego umożliwia uzyskanie zależności pomiędzy rezystancją elementu nadprzewodnikowego, a jego parametrami krytycznymi zbliżonej do występującej w fizycznych modelach, jak pokazano na rysunku 1.3

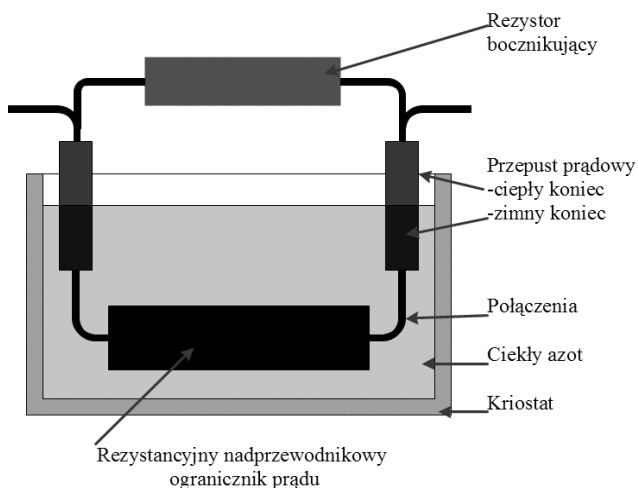


Rys. 3.2.3. Przebieg zmian rezystancji elementu nadprzewodnikowego ogranicznika w jednym cyklu pracy

Na podstawie opisanego powyżej modelu elementu nadprzewodnikowego zaproponowano schematy zastępcze dla trzech podstawowych ograniczników nadprzewodnikowych: rezystancyjnego, indukcyjnego i trójfazowego zintegrowanego.

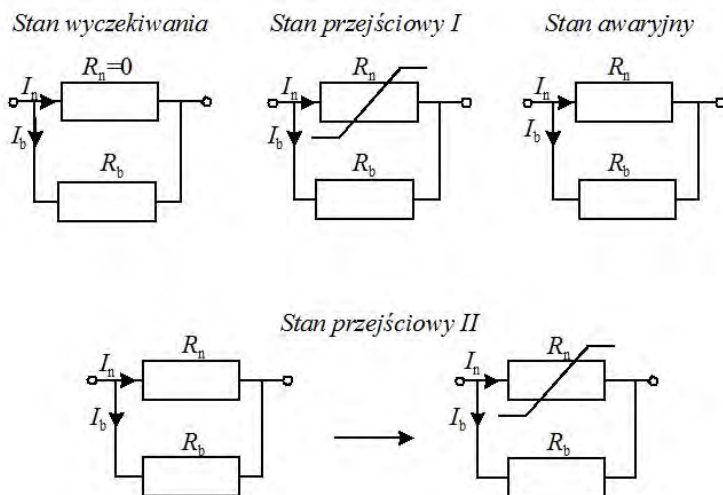
### 3.2.3. Schematy zastępcze rezystancyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

Rezystancyjne nadprzewodnikowe ograniczniki prądu ograniczają wartość prądu awaryjnego dużą rezystancją elementu nadprzewodnikowego pojawiającą się w chwili przejścia tego elementu do stanu rezystywnego [3], [4], [7]. Ograniczniki te charakteryzują się dużą szybkością i niezawodnością zadziałania. Do ich wad należy zaliczyć konieczność stosowania przepustów oraz dużą wrażliwość na termiczne uszkodzenie elementu nadprzewodnikowego spowodowanego przepływem ograniczanego prądu awaryjnego. W ogranicznikach tych stosuje się często rezystory bocznikujące w celu ochrony elementu nadprzewodzącego, jak pokazano na rysunku 3.2.4.



Rys. 3.2.4. Rezystancyjny nadprzewodnikowy ogranicznik prądu z rezystorem bocznikującym

Zaproponowane schematy zastępcze, odpowiadające poszczególnym stanom pracy, rezystancyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu pokazano na rysunku 3.2.5.

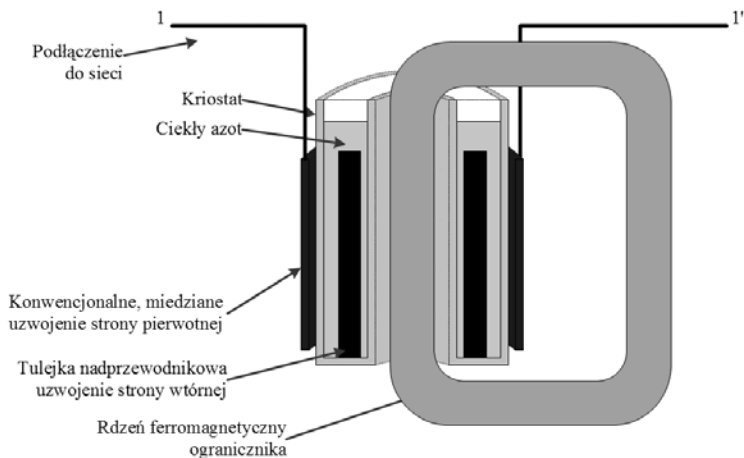


Rys. 3.2.5. Schematy zastępcze rezystancyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

W stanie wyczekiwania rezystancja elementu nadprzewodnikowego ogranicznika rezystancyjnego jest bliska zeru, cały prąd płynie przez element nadprzewodnikowy. W stanie przejściowym pierwszym rośnie wartość rezystancji elementu nadprzewodnikowego, wzrasta udział prądu bocznika, w efekcie gwałtownie rezystancja ogranicznika rośnie. W stanie awaryjnym rezystancja ogranicznika może wzrastać wraz z ewentualnym wzrostem temperatury elementów ogranicznika. Czas trwania stanu przejściowego drugiego może charakteryzować się pewną bezwładnością, związana z ewentualnym wzrostem temperatury elementu nadprzewodnikowego. Wpływ mają także warunki prądowe w jakich zachodzi drugi stan przejściowy, prądowe lub bezprądowe.

### 3.2.4. Schematy zastępcze indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

Ograniczanie prądu awaryjnego przez indukcyjne nadprzewodnikowe ograniczniki prądu realizowane jest poprzez gwałtowny wzrost reaktancji ogranicznika w chwili przekroczenia przez prąd zabezpieczanej linii dopuszczalnej wartości. Budowa ogranicznika jest zbliżona do konstrukcji transformatora jednofazowego, jak pokazano na rysunku 3.2.6, i z modyfikacji jego schematu opracowane schematy zastępcze ogranicznika indukcyjnego [4,6,7]. Na rysunku 3.2.7 pokazano schemat zastępczy dla stanu wyczekiwania. Zaproponowano adaptację schematu zastępczego transformatora powietrznego z rezystancją strony wtórnej, nadprzewodnikowej, równą zero, jako schemat zastępczy ogranicznika indukcyjnego, jak pokazano na rysunku 3.2.7a. Opuszczając, sprzężenie pomiędzy uzwojeniami ogranicznika i odnosząc reaktancję strony wtórnej do strony pierwotnej, można schemat zastępczy zapisać w postaci pokazanej na rysunku 3.2,7b.



Rys. 3.2.6. Schemat budowy indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

### 3.2.4.1. Stan wyczekiwania

W przypadku idealnego sprzężenia, prąd  $I_0$  płynący w gałęzi poprzecznej dąży do zera i w dalszych rozważaniach może zostać pominięta. Współczynnik sprzężenia zależy od wzajemnego położenia uzwojeń ogranicznika względem siebie, równanie 4 obrazuje zależność współczynnika sprzężenia od wymiarów i odległości pomiędzy uzwojeniami ogranicznika.

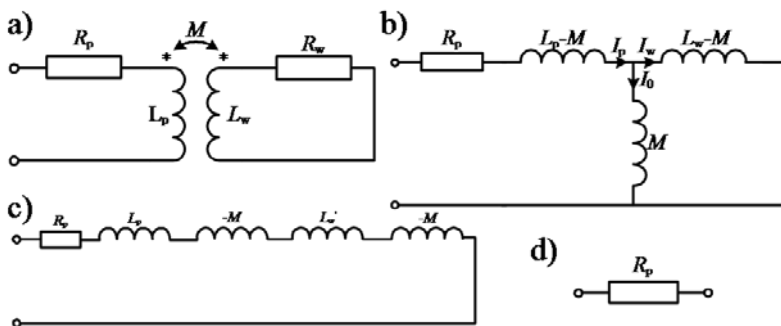
$$k = \frac{l_p^3}{(l_p^2 + (r_p - r_w)^2) \cdot \sqrt{l_p^2 + (r_p - r_w)^2}} \quad (3.2.4)$$

gdzie:

$l_p$  – wysokość uzwojenia pierwotnego,

$r_p$  – promień uzwojenia pierwotnego,

$r_w$  – promień uzwojenia wtórnego



Rys. 3.2.7. Schemat zastępczy indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu  
gdzie:  $R_p$  – rezystancja uzwojenia pierwotnego,  $L_p$  – indukcyjność uzwojenia pierwotnego,  $L_w$  – indukcyjność strony wtórnej,  $R_w$  – rezystancja strony wtórnej,  $M$  – indukcyjność wzajemna

Schmat zastępczy ogranicznika sprowadza się więc do postaci pokazanej na rysunku 3.2.7c. Przy rezystancji strony wtórnej równej zero, współczynniki sprzężenia dążącemu do jedynki i równych reaktancjach strony pierwotnej i wtórnej, które są kompensowane przez reaktancje sprzężenia, pozwala to zapisać ostatecznie schemat ogranicznika w postaci pokazanej na rysunku 3.2.7d.

W schemacie zastępczym rzeczywistego, nie wyidealizowanego ogranicznika, współczynnik sprzężenia jest na tyle bliski jedności, że dopuszczalne jest pominięcie gałęzi pionowej  $M$  z rysunku 3.2.7b, a reaktancje uzwojeń nie są w pełni kompensowane przez reaktancje sprzężenia. W efekcie wydaje się zasadne przyjęcie schematu zastępczego, pokazanego na rysunku 3.2.7c, za najodpowiedniejszy do opisu pracy ogranicznika w stanie wyczekiwania. Impedancja ogranicznika jest więc uzależniona tylko od rezystancji uzwojenia pierwotnego (3.2.5).



$$Z \approx R_p \quad (3.2.5)$$

Parametry schematu zastępczego wyznacza się na podstawie zależności, (3.2.6) dla wyznaczenia rezystancji uzwojeń pierwotnego i wtórnego, (3.2.7) indukcyjność strony pierwotnej, (3.2.8) indukcyjność strony wtórnej i (3.2.9) indukcyjność wzajemna.

$$R_p = \frac{\rho_m \cdot l_m}{S_m} \text{ i } R_w = \frac{\rho_n \cdot l_n}{S_n} \approx 0 \quad (3.2.6)$$

$$L_p = \frac{0,08 \cdot d_p^2 \cdot n_p^2}{3 \cdot d_p + 9 \cdot l_p} \text{ lub } L_p = \frac{0,08 \cdot d_p^2 \cdot n_p^2}{3 \cdot d_p + 9 \cdot l_p + 12 \cdot a_p} \quad (3.2.7)$$

$$L_w = \frac{0,08 \cdot d_w^2}{3 \cdot d_w + 9 \cdot l_w} \quad (3.2.8)$$

$$M = k \sqrt{L_p L_w} \quad (3.2.9)$$

gdzie:

$p$  – indeks uzwojenia pierwotnego,

$w$  – indeks uzwojenia wtórnego,

$d$  – średnica uzwojenia,

$n$  – liczba zwojów,

$l$  – wysokość uzwojenia,

$l_u$  – długość uzwojenia,

$a$  – grubość uzwojenia,

$k$  – współczynnik sprzężenia pomiędzy uzwojeniami,

$r_m$  – jest rezystywnością miedzi,

$r_n$  – rezystywnością nadprzewodnika w stanie rezystywnym,

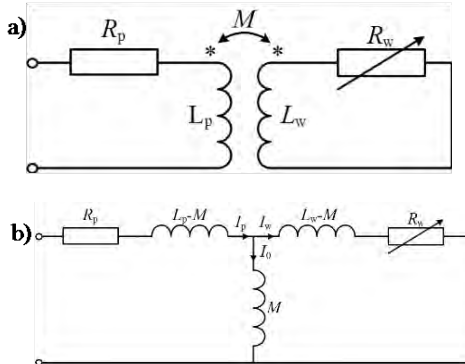
$l_m$  i  $l_n$  – długość uzwojenia miedzianego (pierwotnego) i nadprzewodnikowego (wtórnego),

$S_m$  i  $S_n$  – polami przekroju uzwojeń miedzianego i nadprzewodnikowego.

### 3.2.4.2. Stan przejściowy I

W stanie przejściowym rezystancja uzwojenia nadprzewodnikowego gwałtownie rośnie, maleje wartość prądu wtórnego, co powoduje wzrost reaktancji uzwojenia pierwotnego ogranicznika i tym samym ograniczenie prądu zwarcia. Dodając nieliniową rezystancję, reprezentującą rezystancję nadprzewodnikowej strony wtórnej, do schematu zastępczego stanu wyczekiwania, uzyskuje się schemat zastępczy dla stanu przejściowego, jak pokazano na rysunku 3.2.8a.

Po opuszczeniu sprzężeń, schemat zastępczy ogranicznika sprowadza się do postaci pokazanej na rysunku 3.2.8b.



Rys. 3.2.8. Schemat zastępczy indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w stanie przejściowym

Wraz ze wzrostem wartości prądu, rośnie także rezystancja nadprzewodnikowej strony wtórnej, zgodnie z opisem stanu przejściowego ogranicznika rezystancyjnego. Wzrost rezystancji strony wtórnej powoduje spadek wartości prądu wtórnego, co powoduje spadek wartości reaktancji sprzężenia, a więc zmniejsza się stopień kompensacji reaktancji uzwojeń strony pierwotnej i wtórnej i w efekcie reaktancja ogranicznika rośnie. Impedancja ogranicznika w stanie przejściowym opisana jest równaniem (3.2.10).

$$\underline{Z} = R_p + j(X_{L_p} - X_M) + \frac{(R_w(I_w) + j(X_{L_w} - X_M)) \cdot jX_M}{(R_w(I_w) + jX_{L_w})} \quad (3.2.10)$$

Koniec stanu przejściowego jest określony przez chwilę całkowitego przejścia uzwojenia nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego.

#### 3.2.4.3. Stan awaryjnego ograniczania prądu zwarcia

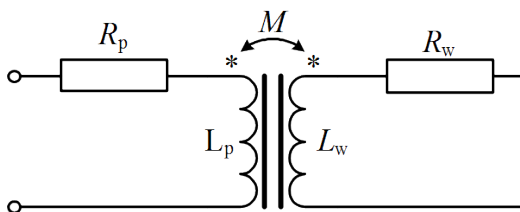
W stanie awaryjnego ograniczania prądu, nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne jest w stanie rezystywnym, a strumień magnetyczny może wnikać do rdzenia ogranicznika. Schemat zastępczy w stanie awaryjnego ograniczania można zapisać w postaci pokazanej na rysunku 3.2.9.

Otwarcie rdzenia ogranicznika dla pola magnetycznego powoduje zmianę sposób wyznaczania indukcyjności uzwojeń ogranicznika, co opisuje równanie (1.11).

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \frac{S}{l} \quad (3.2.11)$$

gdzie:

$\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,  
 $\mu_r$  – względna przenikalność magnetyczna środowiska,  
 $N$  – liczba zwojów,  $S$  – pole przekroju cewki,  
 $l$  – wysokość uzwojeń



Rys. 3.2.9. Schemat zastępczy indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w stanie awaryjnym

Rezystancja nadprzewodnikowej strony wtórnej w stanie rezystywnym jest wielokrotnie większa od rezystancji uzwojenia pierwotnego. Dopuszczalne jest przyjęcie rezystancji uzwojenia nadprzewodnikowego na tyle dużą, że stanowi przerwę w obwodzie. Powoduje to że schemat zastępczy ogranicznika indukcyjnego w stanie awaryjnym sprowadza się do schematu pokazanego na rysunku 3.2.10.



Rys. 3.2.10. Uproszczony schemat zastępczy ogranicznika indukcyjnego w stanie awaryjnym

Impedancja ogranicznika indukcyjnego w stanie awaryjnym zależy więc tylko od parametrów uzwojenia pierwotnego, co zapisano równaniem 3.2.12. Ogranicznik pracuje więc jak dławik.

$$\underline{Z} = R_p + jX_p \quad (3.2.12)$$

Koniec stanu awaryjnego jest określony przez chwilę pojawienia się nadprzewodnictwa w uzwojeniu wtórnym, następujące po samoistnym zaniku prądu zwarciovego lub zadziałaniu konwencjonalnej aparatury zabezpieczającej.

#### 3.2.4.4. Stan przejściowy II

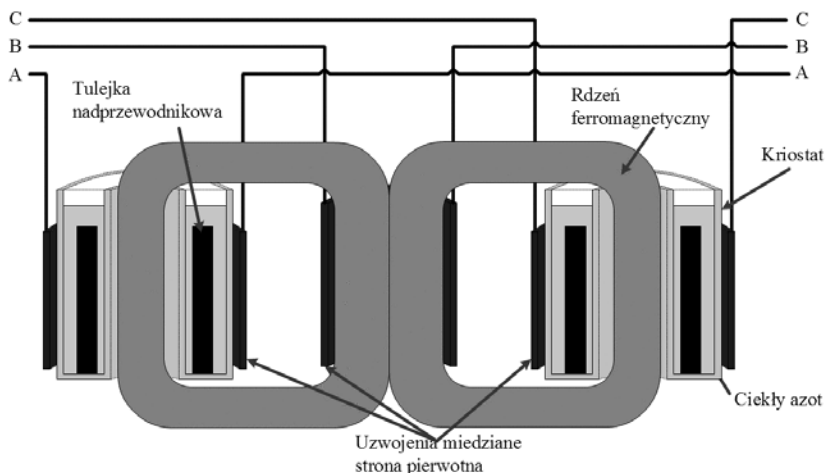
Stan przejściowy drugi ogranicznika indukcyjnego przebiega dwuetapowo. W pierwszym spadek impedancji jest nieznaczny, związany z spadkiem rezystancji elementów ogranicznika wywołanej obniżaniem się ich temperatury. Element nadprzewodnikowy ogranicznika jest w stanie rezystywnym. Schemat zastępczy dla tego etapu jest tożsamy z schematem zastępczym stanu awaryjnego. W drugim etapie rezystancja maleje gwałtownie co jest związane z przejściem elementu nadprzewodnikowego ogranicznika do stanu nadprzewodzenia. Schemat zastępczy dla tego etapu jest zgodny z schematem zastępczym dla I stanu przejściowego.

Impedancję ogranicznika w II stanie przejściowym opisują zależności (3.2.13).

$$\begin{cases} \underline{Z} = R + jX_p & T > T_C \\ \underline{Z} = R_p + j(X_{L_p} - X_M) + \frac{(R_w(I_w) + j(X_{L_w} - X_M)) \cdot jX_M}{(R_w(I_w) + jX_{L_w})} & T \leq T_C \end{cases} \quad (3.2.13)$$

### 3.2.5. Schematy zastępcze trójfazowego ogranicznika prądu z dwoma elementami nadprzewodnikowymi

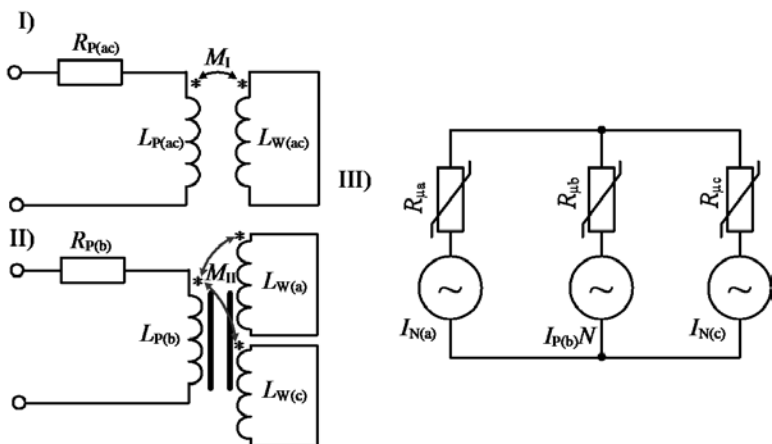
Trójfazowy ogranicznik prądu z dwoma elementami działa w założeniu, że dwa jednofazowe indukcyjne nadprzewodnikowe ograniczniki prądu mogą ograniczać prąd wszystkich możliwych zwarć w układach trójfazowych, jak pokazano na rysunku 3.2.11 [4], [7]. Ze względu na specyfikę konstrukcji schematy zastępcze dla modelowanego ogranicznika będą obiektami składającymi się, ze schematów zastępczych reprezentujących poszczególne fazy ogranicznika i schematu zastępczego sprzęgającego ich obwodu magnetycznego. Dodatkowym czynnikiem komplikującym strukturę projektowanych schematów zastępczych jest duża liczba możliwych konfiguracji występowania prądu zwarciovego w układach trójfazowych.



Rys. 3.2.11 Schemat budowy trójfazowego ogranicznika prądu z dwoma elementami nadprzewodnikowymi

#### 3.2.5.1. Stan wyczekiwania

W stanie wyczekiwania przez poszczególne fazy uzwojeń ogranicznika przepływa prąd dopuszczalny, uzwojenia nadprzewodnikowe są w stanie nadprzewodzącym, „ekranując” rdzeń ogranicznika przed wnikaniem strumienia magnetycznego. Schematy zastępcze dla stanu wyczekiwania pokazano na rysunku 3.2.12.



Rys 3.2.12. Schematy zastępcze trójfazowego ogranicznika prądu dla stanu wyczekiwania:  
 I) dla fazy „a” i „c” z uzwojeniami umieszczonymi na kolumnach zewnętrznych rdzenia  
 II) dla fazy „b” z uzwojeniem umieszczonym na kolumnie środkowej ogranicznika  
 III) dla obwodu magnetycznego ogranicznika

gdzie:

$R_{P(ac)}$ ,  $R_{P(b)}$  – rezystancja uzwojenia pierwotnego,

$L_{P(ac)}$  – indukcyjność strony pierwotnej w fazach a i c,

$L_{P(b)}$  – indukcyjność fazy b,  $I_{P(b)}$  – prąd płynący w fazie b,

$I_{N(ac)}$  – prąd płynący w uzwojeniu nadprzewodnikowym nadprzewodnikowego,

$N$  – liczba zwojów,  $R_{\mu}$  – opór magnetyczny rdzenia

Parametry poszczególnych elementów schematu zastępczego określa się w sposób analogiczny jak przy parametrach elementów schematu zastępczego dla jednofazowego indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w stanie wyczekiwania. W schemacie zastępczym ogranicznika trójfazowego rozróżnia się dwa sprzężenia, pierwsze pomiędzy współosiowymi uzwojeniami, równanie (3.2.14), i drugie pomiędzy uzwojeniem fazy środkowej b a uzwojeniami nadprzewodnikowymi, równanie (3.2.15).

$$k_I = \frac{l_p^3}{(l_p^2 + (r_p - r_w)^2) \cdot \sqrt{l_p^2 + (r_p - r_w)^2}} \quad (3.2.14)$$

$$k_{II} = \frac{l_p^2 \cdot l_w}{(l_p^2 + l_w^2) \cdot \sqrt{l_p^2 + l_w^2}} \quad (3.2.15)$$

gdzie:

$l_p$  – wysokość uzwojenia pierwotnego,

$l_w$  – wysokość uzwojenia wtórnego,

$l_m$  – średnia odległość pomiędzy środkami uzwojeń magnetycznie sprzężonych,

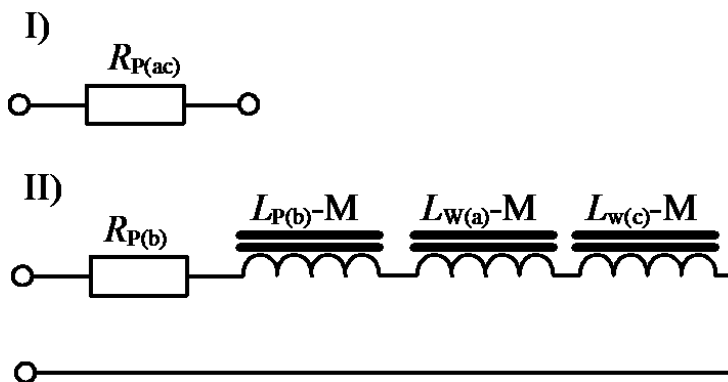
$r_p$  – promień uzwojenia pierwotnego,

$r_w$  – promień uzwojenia wtórnego (nadprzewodnikowego)

Parametry obwodu magnetycznego ogranicznika wyznaczone są po określeniu punktu pracy, przenikalności magnetycznej. W stanie wyczekiwania strumień w rdzeniu jest generowany przez uzwojenie na kolumnie środkowej. Zakłada się, że rozplywa się od równomiernie na kolumny zewnętrzne, gdzie jest kompresowany przez przeciw strumień wytwarzany przez uzwojenia nadprzewodnikowe. Punkt pracy określany jest na podstawie pierwotnej charakterystyki magnesowania rdzenia, po obliczeniu indukcji w rdzeniu na podstawie równania (3.2.16). Następnie można obliczyć opór magnetyczny poszczególnych kolumn rdzenia na podstawie równania (3.2.17).

$$B = \frac{\sqrt{2} \cdot U_s}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot S} \quad (3.2.16)$$

$$R_\mu = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (3.2.17)$$



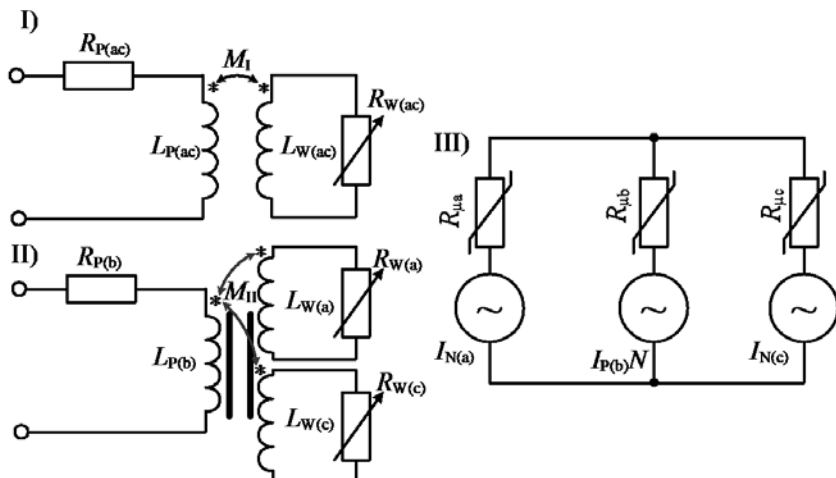
Rys. 3.2.13. Uprozczone schematy obwodowe trójfazowego ogranicznika prądu w stanie wyczekiwania

W stanie wyczekiwania reaktancje uzwojeń ogranicznika są kompensowane reaktancjami sprzężeń. Stopień kompensacji uzwojenia na kolumnie środkowej jest niższy jak w pozostałych fazach, z tego względu impedancja fazy środkowej jest większa od impedancji pozostałych uzwojeń. Schematy obwodowe faz ogranicznika można więc sprowadzić do postaci pokazanej na rysunku 3.2.13.

### 3.2.5.2. Stan przejściowy I

W przejściowym stanie pracy rezystancja uzwojeń nadprzewodnikowych zmienia się nieliniowo zgodnie z równaniem 3.2.1. Stopniowo wraz ze wzrostem rezystancji uzwojeń wtórnych zmniejsza się stopień kompensacji reaktancji faz

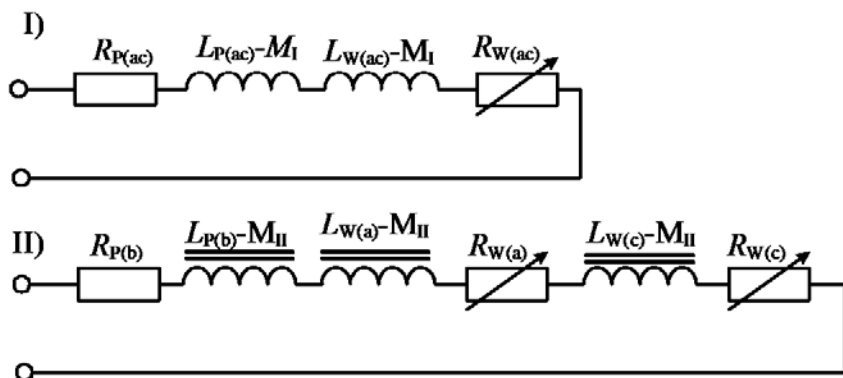
ogranicznika. Schematy zastępcze dla stanu przejściowego zapisano w postaci pokazanej na rysunku 3.2.14.



Rys. 3.2.14. Schematy zastępcze dla stanu przejściowego

I) dla fazy „a” i „c” z uzwojeniami umieszczonymi na kolumnach zewnętrznych rdzenia, II) dla fazy „b” z uzwojeniem umieszczonym na kolumnie środkowej ogranicznika, III) dla obwodu magnetycznego ogranicznika

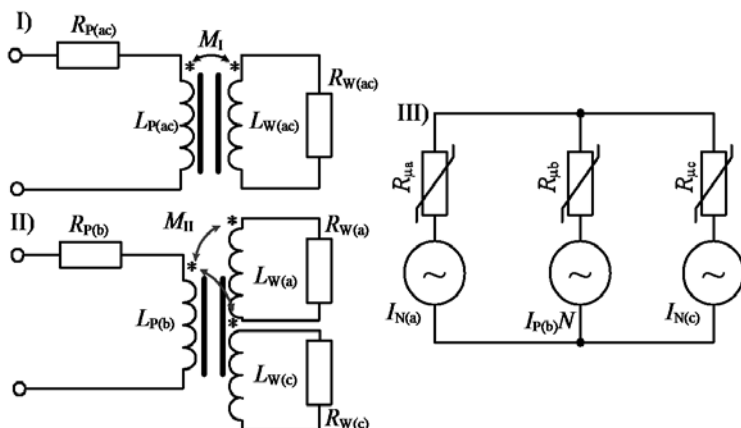
Odnosząc elementy strony wtórnej do strony pierwotnej można uproszczyć obwodowe schematy zastępcze do postaci pokazanej na rysunku 3.2.15.



Rys. 3.2.15. Uproszczone schematy obwodowe trójfazowego ogranicznika prądu w stanie przejściowym

### 3.2.5.3. Stan awaryjnego ograniczania prądu zwarcia

W stanie awaryjnego ograniczania prądu nadprzewodnikowe uzwojenia wtórne są w stanie rezystywnym. Schemat zastępczy w stanie awaryjnego ograniczania można zapisać w postaci pokazanej na rysunku 1.16. W zależności od konfiguracji występowania prądu zwarcia, jedno z uzwojeń nadprzewodnikowych może znajdować się nadal w stanie nadprzewodnikowym.



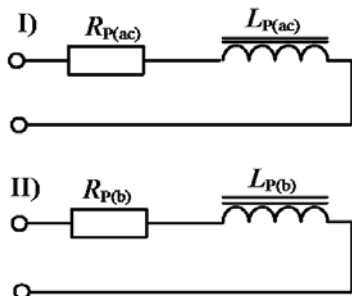
Rys. 3.2.16. Schematy zastępcze dla stanu awaryjnego

I) dla fazy „a” i „c” z uzwojeniami umieszczonymi na kolumnach zewnętrznych rdzenia

II) dla fazy „b” z uzwojeniem umieszczonym na kolumnie środkowej ogranicznika

III) dla obwodu magnetycznego ogranicznika

Zakładając, że rezystancja uzwojeń nadprzewodnikowych dąży do nieskończoności obwodowe schematy zastępcze można sprowadzić do postaci pokazanej na rysunku 3.2.17.



Rys. 3.2.17. Uprozczone schematy obwodowe trójfazowego ogranicznika prądu w stanie awaryjnym

Zadziałanie aparatury zabezpieczającej lub koniec trwania zwarcia powoduje spadek wartości natężenia prądu do poziomu dopuszczalnego. Jeżeli

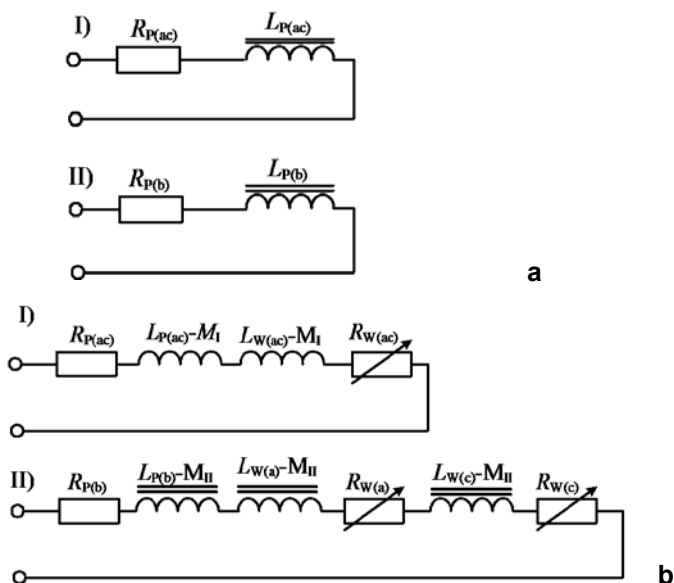


wartość tego prądu będzie niższa od wartości prądu krytycznego ogranicznika, człon nadprzewodzący będzie mógł powrócić do stanu nadprzewodzącego. Proces i czas niezbędny na przejście do stanu nadprzewodzącego zależy od kilku czynników:

- temperatury nadprzewodnika
- sprawności układu chłodzącego
- wartości prądu płynącego w poszczególnych fazach ogranicznika

### 3.2.5.4. Stan przejściowy II

Stan przejściowy drugi ogranicznika trójfazowego przebiega tak samo, jak dla omówionych wcześniej ograniczników jednofazowych. W pierwszym etapie spadek impedancji jest nieznaczny, spowodowany spadkiem rezystancji uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika wywołany obniżaniem się ich temperatury. W drugim etapie spadek impedancji jest gwałtowny, spowodowany powrotem uzwojeń wtórnych do stanu nadprzewodzącego. Schematy zastępcze odpowiadające poszczególnym etapom drugiego stanu przejściowego pokazano na rysunkach, dla etapu pierwszego na rysunku 3.2.18a i dla etapu drugiego na rysunku 3.2.18b.



Rys. 3.2.18. Schematy zastępcze dla drugiego stanu przejściowego ogranicznika trójfazowego

Podobnie jak dla ograniczników jednofazowych, czas trwania stanu przejściowego drugiego jest uzależniony od warunków pracy, przy warunkach bezprądowych stan przejściowy trwa krócej.

### 3.2.6. Numeryczna symulacja pracy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

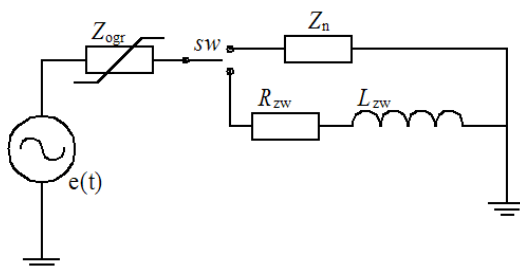
Opracowano uniwersalny numeryczny model pracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu [7]. Model został zapisany jako rozwiązanie dwóch następujących po sobie stanów nieustalonych. Pierwszy stan nieustalony związany jest z pojawieniem się zwarcia, a więc skokową zmianą impedancji obciążenia. Drugi stan nieustalony wynika z zaniku zwarcia, a więc powrotu wartości impedancji obciążenia do wartości znamionowej. Model numeryczny ma postać układu trzech równań prądu płynącego w linii. Równanie (3.1.18) opisuje stan wyczekiwania. Równanie (3.2.19) modeluje przebieg prądu w stanie przejściowym pierwszym i awaryjnym, zaś równanie (3.2.20) opisuje drugi stan przejściowy i wyczekiwania po zwarcu. Opracowany model numeryczny wyznaczony został na podstawie schematu zastępczego obwodu zwarcowego, jak pokazano na rysunku 3.2.19.

$$i_n(t) = \frac{E}{|\underline{Z}|} \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.2.18)$$

$$i_{zw}(t) = \frac{E}{|\underline{Z}_{zw} + \underline{Z}_{ogr}|} \sin(\omega t - \varphi_{zw} - \varphi_n) + \left[ \frac{E}{|\underline{Z}_n|} \sin(-\varphi_n) - \frac{E}{|\underline{Z}_{zw} + \underline{Z}_{ogr}|} \sin(-\varphi_{zw} - \varphi_n) \right] \cdot e^{-\frac{R_{zw} + R_{ogr}}{L_{zw} + L_{ogr}} t} \quad (3.2.19)$$

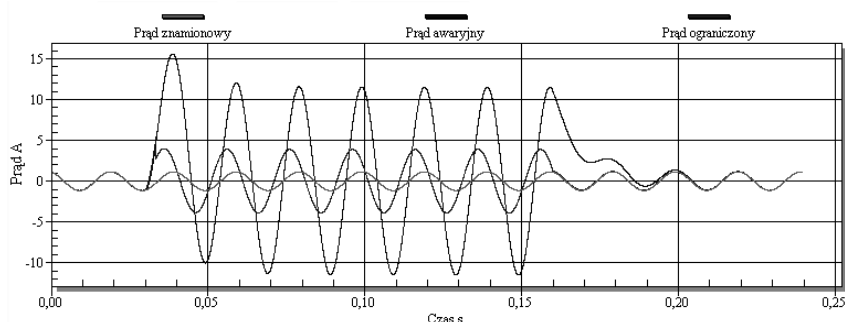
$$i_{zw}(t) = \frac{E}{|\underline{Z}_n|} \sin(\omega t - \varphi_n) + \left[ \frac{E}{|\underline{Z}_n|} \sin(-\varphi_n) - \frac{E}{|\underline{Z}_{zw} + \underline{Z}_{ogr}|} \sin(-\varphi_{zw} - \varphi_n) \right] \cdot \left( 1 + e^{-\frac{R_{zw} + R_{ogr}}{L_{zw} + L_{ogr}} (t - t_{zw})} \right) \cdot e^{-\frac{R_{ob}}{L_{ob}} (t - t_{pow})} \quad (3.2.20)$$

Impedancja ogranicznika wyznaczana jest na podstawie zaproponowanych schematów zastępczych. Na rysunku 3.2.20 pokazano przebiegi prądu znamionowego, awaryjnego i ograniczonego przez indukcyjny nadprzewodnikowy ogranicznik prądu.



Rys. 3.2.19. Schemat zastępczy modelowanego obwodu zwarciego.

$S_w$  – przełącznik symbolizujący pojawienie się i zanik zwarcia,  $Z_n$  – impedancja obwodu w stanie znamionowym,  $R_{zw}$  i  $L_{zw}$  – impedancja obwodu w stanie zwarcia,  $Z_{ogr}$  – nieliniowa impedancja ogranicznika w stanie awaryjnym



Rys. 3.2.20. Symulacja działania indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu opracowana na podstawie schematów zastępczych i modelu numerycznego

### 3.2.7. Wnioski

Zaproponowany spójny model budowy schematów zastępczych opracowywanych z wykorzystaniem modelu nieliniowego elementu nadprzewodnikowego umożliwił opracowanie schematów zastępczych dla trzech nadprzewodnikowych ograniczników prądu, rezystancyjnego, indukcyjnego z zamkniętym rdzeniem i trójfazowego z dwoma elementami nadprzewodnikowymi. Analiza sieci elektroenergetycznej realizowana jest na podstawie jej schematu zastępczego i schematów zastępczych urządzeń w niej umiejscowionych. Analizę współpracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu z siecią energetyczną najwygodniej przeprowadzić za pomocą ich schematów zastępczych. Opracowane schematy oddają specyfikę pracy poszczególnych ograniczników nadprzewodnikowych, ułatwiając analizę ich działania w różnych układach. Model numeryczny opracowany z wykorzystaniem zaproponowanych schematów zastępczych, umożliwia opisanie matematyczne działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu w pełnym cyklu pracy.

### 3.3. Nadprzewodnikowy zasobnik energii

#### 3.3.1. Wstęp

System SMES (superconducting magnetic energy storage) jest urządzeniem pozwalającym na magazynowanie energii w polu magnetycznym. Pole magnetyczne w systemie SMES jest wytwarzane przez prąd stały płynący w elektromagnesie nadprzewodnikowym [1].

Nadprzewodnikowe zasobniki energii charakteryzuje bardzo duża gęstość mocy, którą można pobrać lub oddać w bardzo krótkim czasie, dlatego głównym obszarem zastosowań systemów SMES jest zabezpieczenie przed nieplanowanymi przerwami w dostawie energii, zapewnienie jakości dostarczanej energii elektrycznej poprzez łagodzenie efektów chwilowych zaników napięcia, a także do wyrównywania obciążeń mocy odbiorników energii pracujących w sposób impulsowy lub przerywany [1].

W Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie zaprojektowano i wykonano elektromagnes nadprzewodnikowy dla SMESa, pracujący z elektronicznym konwerterem umożliwiającym dwukierunkowy przepływ energii pomiędzy siecią elektryczną i elektromagnesem nadprzewodnikowym. Inne projekty SMES realizowane w światowych ośrodkach naukowych można znaleźć w literaturze [1]-[9].

#### 3.3.2. Energia w elektromagnesie nadprzewodnikowym SMES

W schłodzonym uzwojeniu nadprzewodnikowym prąd płynie bez strat, więc zmagazynowana energia nie jest rozpraszana i może być przechowywana dowolnie długo, gdy elektromagnes znajduje się w stanie nadprzewodzącym [1]. Energia zmagazynowana w polu magnetycznym elektromagnesu nadprzewodnikowego jest proporcjonalna do jego indukcyjności oraz prądu w magnesie. Energia pola magnetycznego w elektromagnesie można wyrazić równaniem:

$$E = \frac{1}{2} L I^2 \quad (3.3.1)$$

gdzie:

$E$  – energię (J),  $L$  – oznacza indukcyjność elektromagnesu (H),

$I$  – prąd płynący w elektromagnesie (A).

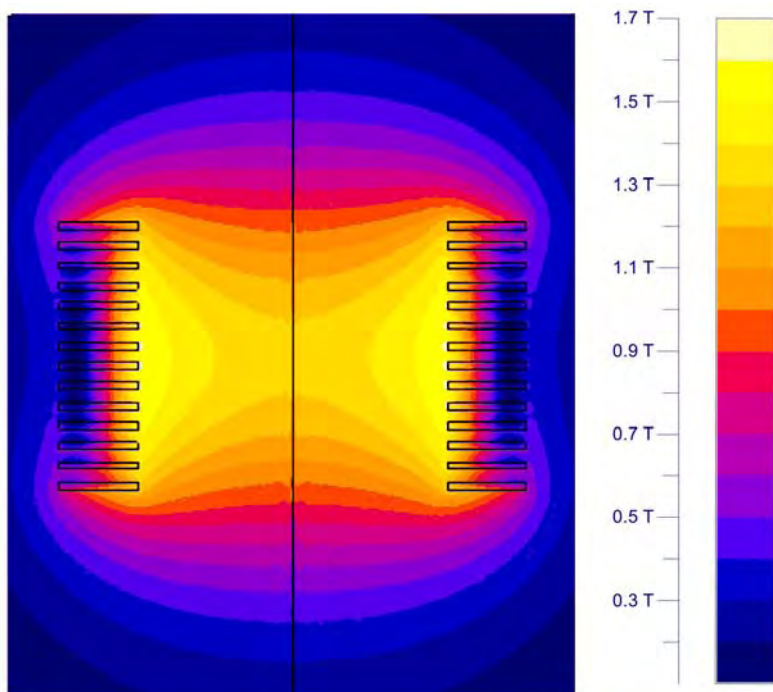
Wartość prądu pracy w magnesie nadprzewodnikowych musi być mniejsza od prądu krytycznego taśmy. Prąd krytyczny taśmy nadprzewodnikowej dwuczewki jest zależny od wartości składowej prostopadłej pola magnetycznego występującej na powierzchni taśmy HTS oraz od temperatury pracy przewodów nadprzewodnikowych. Obniżenie temperatury pracy przewodów HTS znacznie powiększa wartości ich prądów krytycznych. W celu zwiększenia prądu roboczego w magnesie nadprzewodnikowym konieczne jest więc równoczesne obniżenie jego temperatury (rys. 3.3.2). Dla wykonanego elektromagnesu nadprzewodnikowego dla systemu SMES spodziewana maksymalna wartość

zmagazynowanej energii wynosi 34.8 kJ w temperaturze 13 K przy prądzie pracy równym  $I = 264$  A. Wartości prądu krytycznego oraz energii zgromadzonej w wykonanym elektromagnecie w innych temperaturach pracy zamieszczono w tablicy 3.3.1.

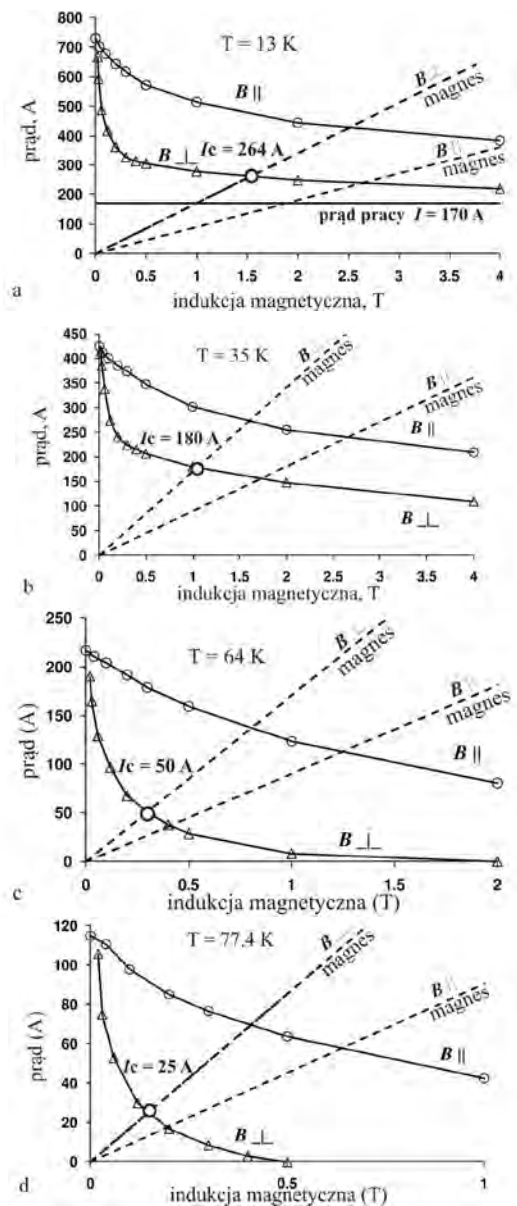
Tablica 3.3.1. Wartości energii zgromadzonej w elektromagnecie SMESa

| Temperatura | Prąd krytyczny | Energia zmagazynowana |
|-------------|----------------|-----------------------|
| K           | A              | kJ                    |
| 77          | 25             | 0.31                  |
| 64          | 50             | 1.25                  |
| 35          | 180            | 16.2                  |
| 13          | 264            | 34.8                  |

Przykładowy rozkład pola magnetycznego w wykonanym elektromagnecie nadprzewodnikowym przy prądzie równym 170 A przedstawiono na rys. 3.3.1. Największa wartość indukcji magnetycznej równa 1,7 T występuje w punkcie w pobliżu uzwojenia nadprzewodnikowego usytuowanego w pobliżu środka magnesu. Maksymalna wartość pola magnetycznego na osi magnesu jest równa 1,5 T.



Rys. 3.3.1. Rozkład pola magnetycznego wewnątrz elektromagnesu nadprzewodnikowego przy prądzie równym 170 A.



Rys. 3.3.2. Charakterystyki  $I_c - B$  taśmy nadprzewodnikowej Bi-2223 HTS Strength Wire w temperaturach 13 K, 35 K, 64 K i 77,4 K z uwzględnieniem równoległej i prostopadłej składowej pola magnetycznego.

### 3.3.3. Elektromagnes nadprzewodnikowy

Do wykonania elektromagnesu nadprzewodnikowego użyto taśmy nadprzewodnikowej Bi-2223 HTS Strenght Wire produkcji American Superconductor. Jest to taśma nadprzewodnikowa o budowie kompozytowej wykonana z włókien nadprzewodnikowych Bi-2223 umieszczonych w matrycy srebrnej, dodatkowo taśma typu AMSC HTS Strengt Wire pokryta jest laminatem stalowym w celu zwiększenia jej wytrzymałości mechanicznej. Przekrój taśmy nadprzewodnikowej przedstawiono na rys. 3.3.3.



Rys. 3.3.3. Przekrój taśmy nadprzewodnikowej produkcji AMSC.

Taśma nadprzewodnikowa użyta do wykonania magnesu ma szerokość 4,2 mm i grubość 0,31 mm, inne parametry taśmy nadprzewodnikowej zamieszczono w tabeli nr 3.1.1. Całkowita ilość taśmy AMSC Bi-2223 HTS Strenght Wire wykorzystana do wykonania elektromagnesu wynosi 1621 m.

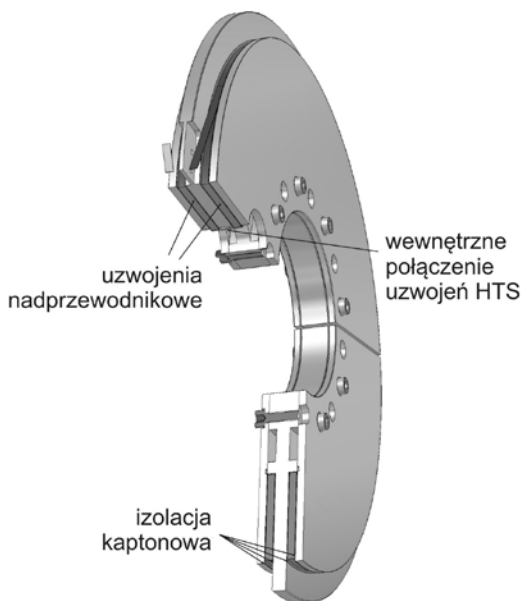
Tab. 3.3.2. Parametry taśmy Bi-2223 [1]

|                        |                                                                         |    |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Taśma nadprzewodnikowa | HTS High Strength Wire Stainless Steel Laminated                        |    |
| Nadprzewodnik          | Bi-2223 ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ) |    |
| Grubość                | 0,31                                                                    | mm |
| Szerokość              | 4,2                                                                     | mm |
| Min. średnica gięcia   | 70                                                                      | mm |
| Prąd krytyczny         | 115                                                                     | A  |
| Temperatura krytyczna  | 77                                                                      | K  |

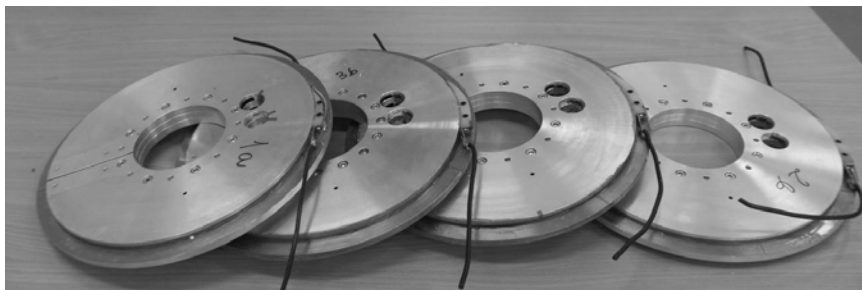
Elektromagnes nadprzewodnikowy SMESa został zaprojektowany w sposób umożliwiający magazynowanie maksymalnej energii w uzwojeniu HTS. Wykonany w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie elektromagnes złożony jest z 14 cewek krążkowych. Cewki nawinięto w postaci dwóch uzwojeń nawiniętych na wspólnym karkasie tworzących dwucewkę.

Przekrój dwucewki nadprzewodnikowej przedstawiono na Rys. 3.3.4. Uzwojenie nadprzewodnikowe ma wewnętrzną średnicę równą 210 mm, średnica zewnętrzna uzwojenia wynosi 315 mm. Karkas uzwojenia nadprzewodnikowego jest wykonany z aluminium. Wszystkie aluminiowe części karkasu są przecięte w celu minimalizacji prądów wirowych. Masa pojedynczej dwucewki wynosi 6,5 kg. Poszczególne uzwojenia HTS dwucewki zostały nawinięte w przeciwnych kierunkach i połączone wewnątrz taśmą

nadprzewodnikową poprzez zlutowanie. Połączenia pomiędzy uzwojeniami dwucewki zostały wykonane taśmą HTS AMSC Bi-2223 Strenghht Wire. Każda z dwucewek ma cztery równoległe połączenia taśmą HTS umieszczone w dwóch otworach montażowych (Rys. 3.3.4.).



Rys. 3.3.4. Przekrój dwucewki nadprzewodnikowej.



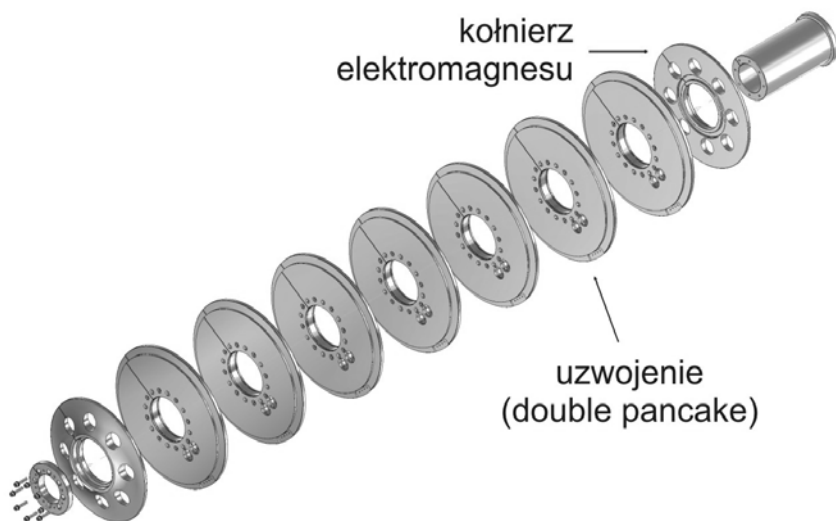
Rys. 3.3.5. Widok wykonanych dwucewek dla elektromagnesu HTS.

Podstawową izolacją elektryczną zwojów, cewek i uzwojeń nadprzewodnikowych jest folia poliimidowa Kapton HN o grubości 25  $\mu\text{m}$ , dodatkowo każde z uzwojeń nadprzewodnikowych elektromagnesu zostało zaimpregnowane żywicą epoksydową podczas nawijania.

Elektromagnes nadprzewodnikowy składa się z siedmiu dwucewek połączonych szeregowo (rys. 3.3.6.). Wyprowadzenia prądowe poszczególnych



cewek nadprzewodnikowych są usytuowane po zewnętrznej stronie elektromagnesu. Połączenia pomiędzy dwucewkami wykonane są krótkimi kawałkami taśmy nadprzewodnikowej po całkowitym mechanicznym montażu magnesu. Średnia rezystancja połączenia pomiędzy dwucewkami wynosi  $1,5 \text{ m}\Omega$  w temperaturze pokojowej. Całkowita masa magnesu jest równa 53 kg.

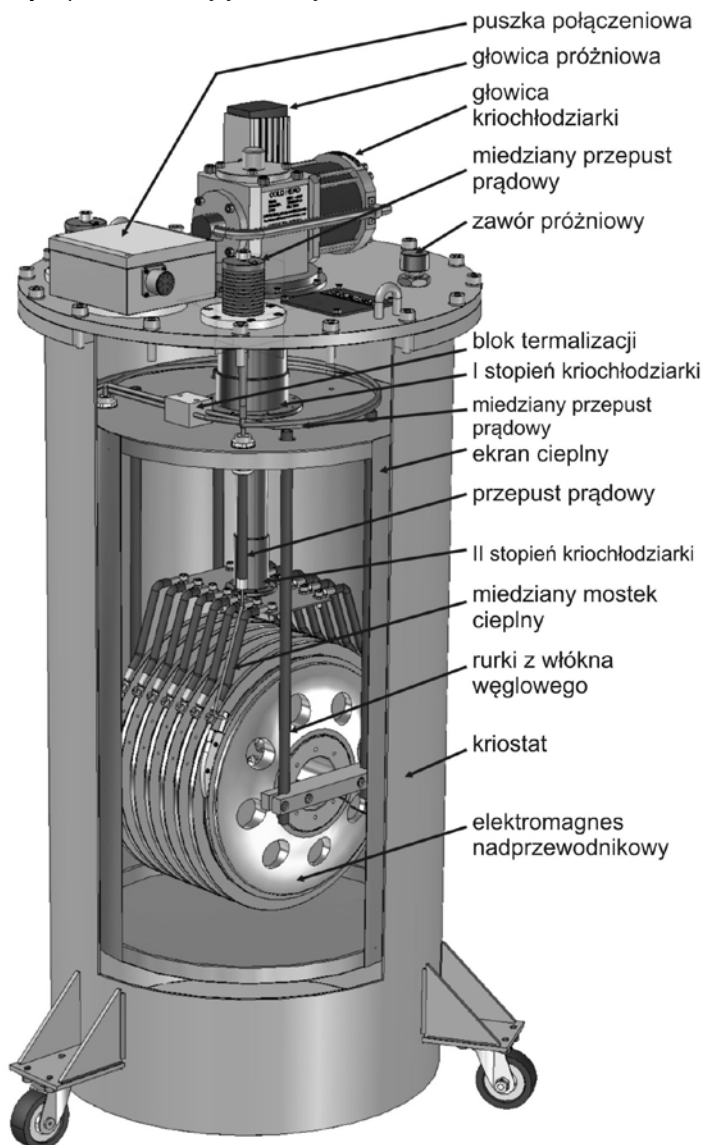


Rys. 3.3.6. Elementy elektromagnesu nadprzewodnikowego - rysunek złożeniowy.

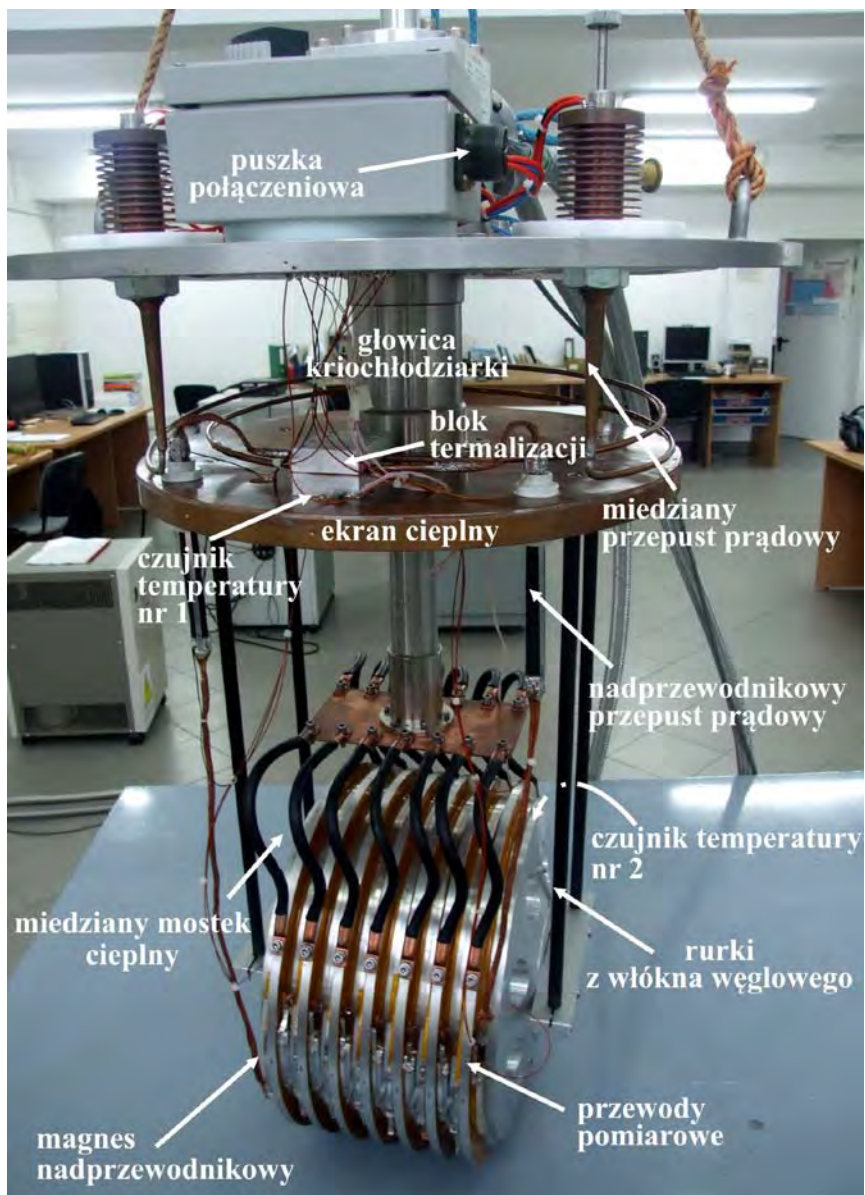


Rys. 3.3.7. Widok zmontowanego magnesu nadprzewodnikowego dla SMESa.

Model CAD magnesu nadprzewodnikowego umieszczonego w kriostacie próżniowym przedstawiony jest na rys. 3.3.8.



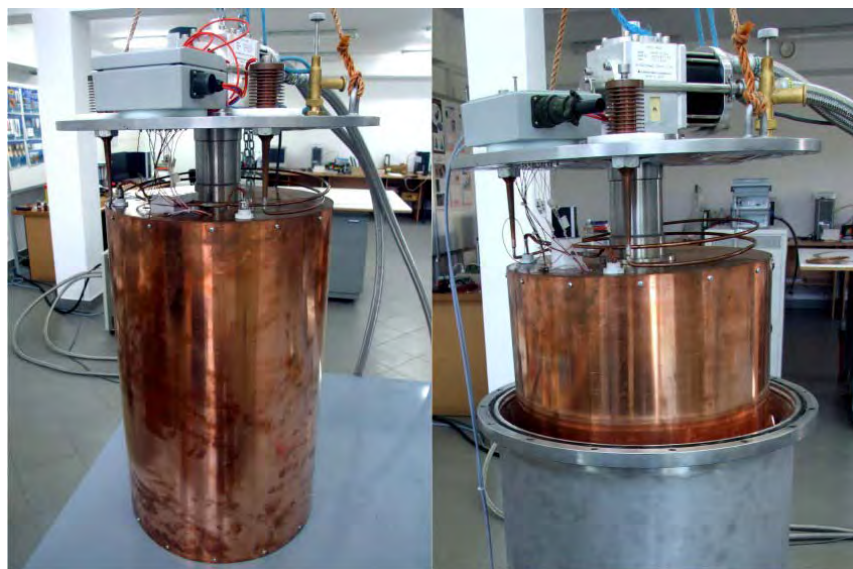
Rys. 3.3.8. Model CAD elektromagnesu nadprzewodnikowego umieszczonego w kriostacie próżniowym.



Rys. 3.3.9. Magnes nadprzewodnikowy bez zewnętrznej części miedzianego ekranu cieplnego.



Rys. 3.3.10. Elektromagnes SMESa w kriostacie.



Rys. 3.3.11. Elektromagnes nadprzewodnikowy z zamontowanym ekranem cieplnym podczas montażu w kriostacie.

### 3.3.4. Chłodzenie elektromagnesu nadprzewodnikowego

Podstawowym elementem układu nadprzewodnikowego zasobnika energii jest elektromagnes nadprzewodnikowy, który jest schłodzony do temperatur kriogenicznych. Wykonany elektromagnes nadprzewodnikowy chłodzony jest dwustopniową głowicą chłodzącą SRDK-408 połączoną z kompresorem helowym CSW-71D chłodzonym wodą. Miedziany ekran cieplny oraz przepusty prądowe chłodzone są przez I stopień głowicy kriołodziarki, natomiast elektromagnes nadprzewodnikowy jest chłodzony przez II stopień kriołodziarki. Elektromagnes nadprzewodnikowy chłodzony jest przez kriołodziarkę na drodze przewodnictwa cieplnego poprzez miedziane mostki cieplne (rys. 3.3.9). Każda z dwucewek elektromagnesu jest połączona oddzielnie do drugiego stopnia kriołodziarki poprzez własny mostek cieplny. W celu zredukowania wpływu naprężeń mechanicznych występujących podczas chłodzenia magnesu, mostek cieplny pomiędzy drugim stopniem kriołodziarki i aluminiowym karkasem dwucewki został wykonany jako połączenie elastyczne. Do wykonania mostka cieplnego użyto plecionki miedzianej zakończonej miedzianymi końcówkami oczkowymi po obu końcach mostka w celu mechanicznego połączenia mostka cieplnego do głowicy kriołodziarki i aluminiowego karkasu magnesu (rys. 3.3.9). Całkowity przekrój miedzianego mostka cieplnego jest równy  $224 \text{ mm}^2$ , a jego długość wynosi 150 mm.

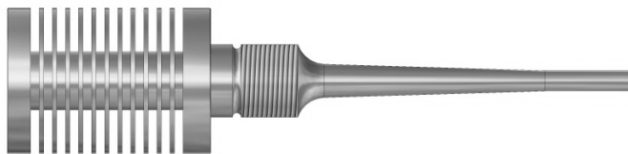
Urządzenia nadprzewodnikowe są izolowane termicznie od otoczenia, co realizowane jest przez umieszczenie ich w specjalnych kriostatach wyposażonych w izolację termiczną minimalizującą dopływ ciepła z zewnątrz drogą przewodnictwa, konwekcji i promieniowania. Wykonany magnes nadprzewodnikowy umieszczony jest w kriostacie próżniowym wykonanym ze stali nierdzewnej (rys. 3.3.8). Elektromagnes nadprzewodnikowy zawieszony jest na pierwszym stopniu kriołodziarki na konstrukcji wykonanej z rurek z włókna węglowego. W całej przestrzeni kriostatu utrzymywana jest wysoka próżnia  $10^{-8}$  mbar. W celu zminimalizowania strat cieplnych na drodze promieniowania, magnes nadprzewodnikowy został umieszczony w miedzianym ekranie cieplnym chłodzonym przez pierwszy stopień kriołodziarki, a wewnątrz kriostatu próżniowego zostało wyłożone superizolacją (rys. 3.3.12).



Rys. 3.3.12. Wnętrze kriostatu próżniowego wyłożone superizolacją.

### 3.3.5. Przepusty nadprzewodnikowe

Przepusty prądowe łączą elektrycznie nadprzewodnikowe uzwojenie elektromagnesu z zewnętrznym układem zasilającym. W celu doprowadzenia prądu roboczego z zasilacza do elektromagnesu nadprzewodnikowego z minimalnym przepływem ciepła i minimalną generacją ciepła Joule'a w przepustach prądowych, zostały zaprojektowane i wykonane hybrydowe przepusty prądowe. Przepust prądowy jest połączeniem miedzianego przepustu prądowego jako ciepłą częścią (rys. 3.3.13) i przepustu nadprzewodnikowego jako częścią zimną (rys. 3.3.14). Część miedziana przepustu prądowego jest umieszczona pomiędzy temperaturą pokojową i pierwszym stopniem głowicy kriochołdziarki. Część nadprzewodnikowa przepustu prądowego jest umieszczona pomiędzy pierwszym stopniem kriochołdziarki i magnesem nadprzewodnikowym. Część nadprzewodnikowa przepustu prądowego została wykonana z cylindra nadprzewodnikowego Bi-2223 z posrebrzonymi końcówkami produkcji (Can Superconductors) oraz trzech kawałków taśmy nadprzewodnikowej połączonej równolegle. Do realizacji hybrydowych przepustów nadprzewodnikowych została użyta taśma HTS 115 A American Superconductor tape Bi-2223 Strength Wire. Przepusty prądowe są chłodzone na drodze przewodnictwa cieplnego poprzez kontakt z blokiem termalizacji podłączonym do pierwszego stopnia głowicy kriochołdziarki (rys. 3.3.8).



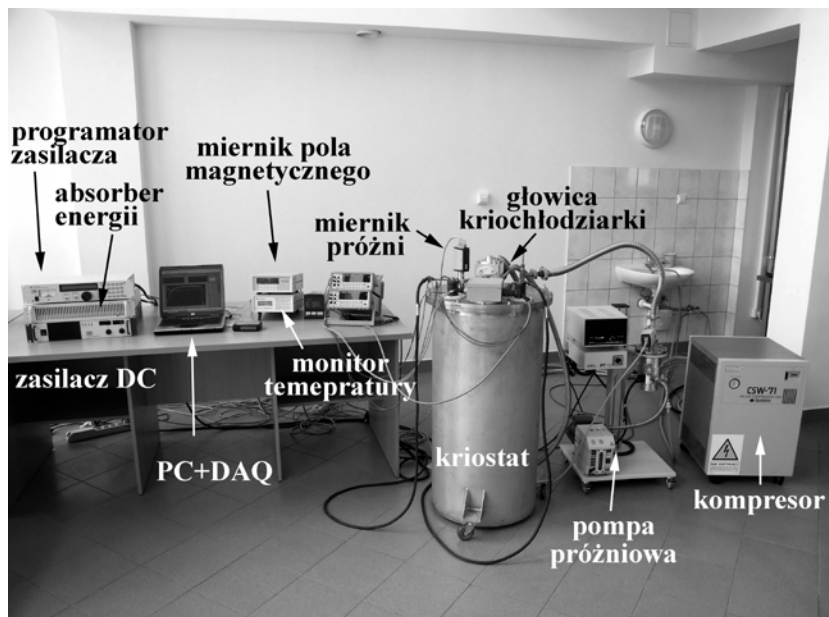
Rys.3.3.13. Przepust prądowy dla elektromagnesu SMES'a - część miedziana



Rys. 3.3.14. Przepust prądowy dla elektromagnesu SMES'a - część nadprzewodnikowa

### 3.3.6. System pomiarowy

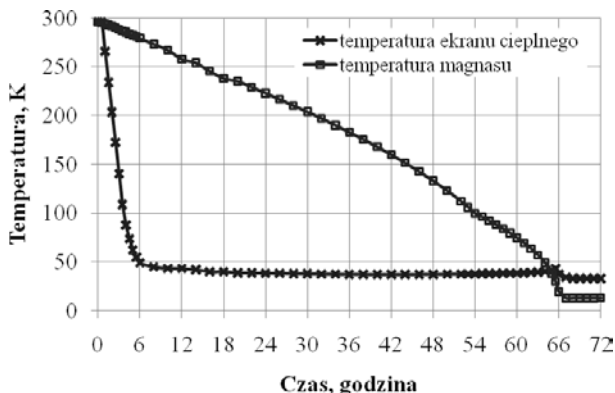
Układ pomiarowy wykorzystany w pomiarach eksperymentalnych elektromagnesu SMESa jest przedstawiony na rys. 3.3.15. W skład systemu pomiarowego wchodzi karta pomiarowa oraz komputer PC z systemem archiwizacji danych pomiarowych. Elektromagnes nadprzewodnikowy jest wyposażony w wyprowadzenia napięciowe, dzięki czemu możliwe jest monitorowanie napięć na poszczególnych uzwojeniach nadprzewodnikowych oraz na przepustach prądowych. Do pomiaru i archiwizacji danych posłużyła karta pomiarowa USB-4716 produkcji Advantech. W celu obserwacji, analizy i archiwizacji danych pomiarowych został napisany specjalny program w środowisku LabView, Program poza pomiarem napięć na wyprowadzeniach napięciowych z magnesu nadprzewodnikowego i przepustów nadprzewodnikowych umożliwia również pomiaru prądu roboczego płynącego przez elektromagnes. Do testów elektromagnesu SMESa został użyty zasilacz prądu stałego AMI 12200PS 0-200 A, 0-12 V produkcji American Magnetic współpracujący z absorberem energii AMI Model 601. Elektromagnes nadprzewodnikowy SMESa wyposażony jest w dwa czujniki temperatury Cernox firmy Lake Shore podłączone do monitora temperatury Lake Shore Model 218. Jeden z czujników temperatury jest umieszczony na ekranie cieplnym chłodzonym pierwszym stopniem kriołodziarki, drugi monitoruje temperaturę magnesu nadprzewodnikowego (rys. 3.3.8).



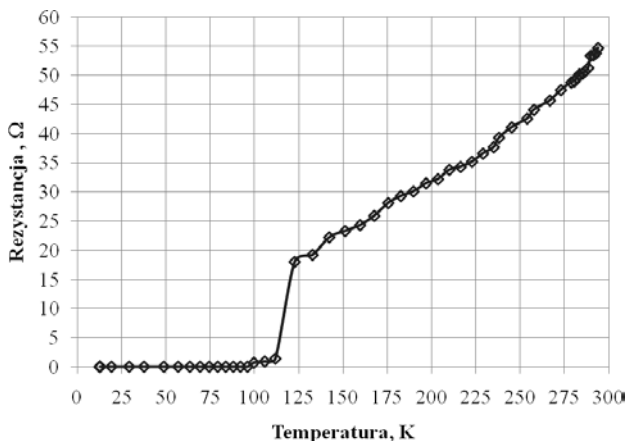
Rys. 3.3.15. System chłodzenia, zasilania i archiwizacji danych pomiarowych elektromagnesu SMESa.

### 3.3.7. Wyniki eksperymentalne

Kriostat z głowicą chłodzącą oraz elektromagnesem nadprzewodnikowym został podłączony do systemu chłodzącego. Po osiągnięciu wewnątrz kriostatu próżni o wartości  $7 \times 10^{-8}$  mbar został włączony system chłodzący kriochłodziarki. Temperatura magnesu zaczęła łagodnie spadać (rys. 3.3.16). Bez prądu roboczego magnes nadprzewodnikowy osiągnął stabilną temperaturę 13 K po upływie 67 godzin chłodzenia. Miedziany ekran cieplny osiągnął temperaturę bliską 37 K po 26 godzinach chłodzenia, a następnie stabilną temperaturę 32 K po upływie 67 godzin chłodzenia. Rezystancja elektromagnesu w temperaturze pokojowej wynosi 54.66  $\Omega$ . Zmianę rezystancji magnesu w funkcji temperatury została przedstawiono na rys. 3.3.17.



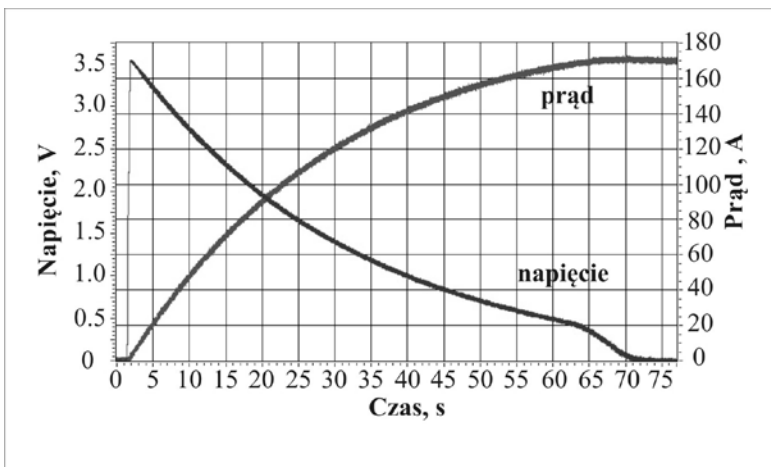
Rys. 3.3.16. Charakterystyka chłodzenia elektromagnesu SMESa.



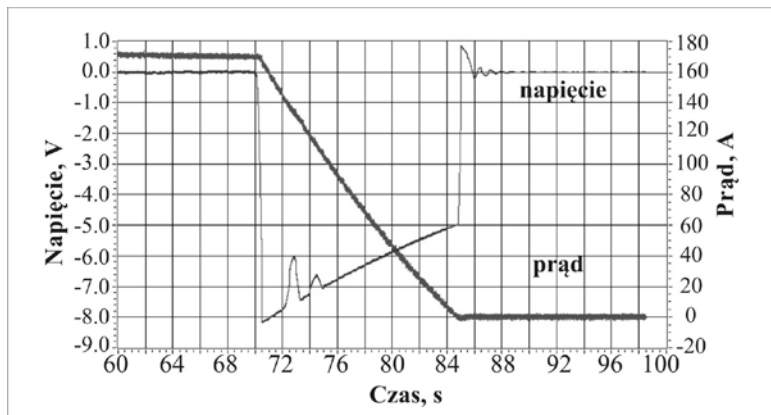
Rys. 3.3.17. Zmiana rezystancji elektromagnesu SMESa w funkcji temperatury.



Po ustabilizowaniu się temperatury elektromagnesu, zasilono go prądem stałym. Maksymalny prąd testowy płynący przez magnes wynosił 170 A. Prąd magnesu został zwiększony od zera do 170 A w czasie 70 s, a następnie zmniejszony do zera w czasie 15 s. Na rys. 3.3.18 przedstawiono prąd płynący w magnesie oraz napięcie na magnesie nadprzewodnikowym podczas narastania prądu od zera do 170 A. Prąd magnesu oraz napięcie na magnesie podczas zmniejszenia prądu ze 170 A do zera przedstawia rys. 3.3.19. Podczas zmniejszania prądu od 170 A do zera, napięcie na magnesie nie przekroczyło wartości 8,1 V.



Rys. 3.3.18. Napięcie na elektromagnesie nadprzewodnikowym podczas narastania prądu.



Rys. 3.3.19. Napięcie na elektromagnesie nadprzewodnikowym podczas zmniejszania prądu.

### 3.3.8. Podsumowanie

Elektromagnes nadprzewodnikowy dla systemu SMES został zaprojektowany i wykonany w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie. Zastosowanie kriostatu próżniowego, miedzianego ekranu cieplnego, dobrej izolacji próżniowej oraz hybrydowych przepustów nadprzewodnikowych pozwoliło schłodzić elektromagnes nadprzewodnikowy przez kriochłodziarkę na drodze przewodnictwa cieplnego do temperatury pracy równej 13 K. Wykonano system kontrolno pomiarowy umożliwiający kontrolę temperatury elektromagnesu nadprzewodnikowego oraz archiwizację danych pomiarowych. Przeprowadzono pierwsze testy wprowadzania i wyprowadzania energii do elektromagnesu dla systemu SMES.

### 3.4. Literatura

- [1] Lee B. W., Sim J., Park K. B., Oh I. S., Practical application issues of superconducting fault current limiters for electrical power system, Transactions on Applied Superconductivity, IEEE 2008, 620-623
- [2] Kang H., Lee Ch., Nam K., Yoon Y. S., Chang H., Ko T. K., Seok B., Development of a 13.2 kV/630 A (8.3 MVA) high temperature superconducting Fault current limiter, Transactions on Applied Superconductivity, IEEE 2008, 628-631
- [3] Shirai Y., Furushiba K., Shouno Y., Shiotsu M., Nitta T., Improvement of power system stability by use of superconducting fault current limiter with ZnO device and resistor in parallel, Transactions on Applied Superconductivity, IEEE 2008, 680-683
- [4] Janowski T., Stryczewska H. D., Kozak S., Malinowski H., Wojtasiewicz G., Surdacki P., Konratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Nadprzewodnikowe ograniczniki Prądu, Wydawnictwo Drukarnia LIBER, 2002
- [5] Noe M., Juengst K., Werfel F., Elschner E., Bock J., Breuer F., Kreutz R., Test bulk HTS modules for resistive superconducting fault current limiters, ASC2002, 2002
- [6] Kozak J., Analiza skuteczności działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego z rdzeniem bezjarzmowym, Praca doktorska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, 2006
- [7] Łanczont M., Schematy zastępcze nadprzewodnikowych ograniczników prądu w stanach ustalonych i przejściowych, Praca doktorska, Lublin 2009
- [8] Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Kozak S., Majka M., Malinowski H., Surdacki P., Wojtasiewicz G., "Nadprzewodnikowe zasobniki energii", Wydawnictwo Liber Duo s.c., Lublin 2007.
- [9] Kozak, J., Kozak, S., Janowski, T., Majka, M., "Design and performance results of first polish SMES", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, pp. 1981–1984, 2009.
- [10] G. Wojtasiewicz, T. Janowski, S. Kozak, B. Kondratowicz-Kucewicz, and M. Majka, "Bi-2223 Magnet for the Model of SMES," Journal of Physics, Conference Series 97, 012019, 2008

- [11] R. Kreutz, H. Salbert, D. Krischel, A. Hobl, C. Radermacher, N. Blacha, P. Behrens, and K. Dutsch, "Design of a 150 kJ high-Tc SMES for a 20 kVA uninterruptible power supply system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp. 1860–1862, 2003.
- [12] E. Buckles, M.A. Daugherty, B.R. Weber, and E.L. Kostecki, The SSD: A Commercial Application of Magnetic Energy Storage, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 3, pp. 328–331, 1993.
- [13] C. Luongo. Superconducting Storage Systems: An Overview, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 4, pp. 2214–2217, 1996.
- [14] Q. Wang, Y. Dai, S. Song, H. Wen, Y. Bai, L. Yan, K. Kim, "A 30kJ Bi2223 high temperature superconducting magnet for SMES with solid-nitrogen protection," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 18, no. 2, pp. 754-757, 2008.
- [15] T. Katagiri, H. Nakabayashi, Y. Nijo, T. Tamada, T. Noda, N. Hirano, T. Nagata, S. Nagaya, M. Yamane, Y. Ishii, and T. Nitta, "Field test result 10MVA/20MJ SMES for load fluctuation compensation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, pp. 1993-1998, 2009.
- [16] Q. Wang, S. Song, Y. Lei, Y. Dai, B. Zhang, C. Wang, S. Lee, K. Kim, "Design and fabrication of a conduction-cooled high temperature superconducting magnet for 10 kJ superconducting magnetic energy storage system", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, pp. 1993-1998, 2009.

## 4. ELEKTROMAGNESY NADPRZEWODNIKOWE

Materiały nadprzewodnikowe w postaci przewodów wykorzystywane są do budowy stałoprądowych elektromagnesów wytwarzających silne pola magnetyczne w dużych przestrzeniach roboczych. Elektromagnesy nadprzewodnikowe stosowane są w fizyce cząstek elementarnych do skupiania i odchyłania strumienia cząstek oraz magazynowania cząstek w pierścieniach. Uzwojenia nadprzewodnikowe pozwalają na magazynowanie energii elektromagnetycznej w SMES-ach. W badaniach nad kontrolowaną syntezą termojądrową do ogniskowania plazmy wykorzystywane jest pole magnetyczne wytwarzane przez elektromagnesy nadprzewodnikowe.

Elektromagnesy nadprzewodnikowe wykorzystywane są z powodzeniem w aparaturze NMR i aparaturze MRI i obok elektromagnesów nadprzewodnikowych separatorów magnetycznych są jednym z pierwszych komercyjnych zastosowań nadprzewodnictwa w dużych urządzeniach.

### 4.1. Elektromagnesy dla separatorów magnetycznych

#### 4.1.1. Wprowadzenie

Wzajemne oddziaływania między materią i polem magnetycznym, były obiektem zainteresowania badaczy już w drugiej połowie XIX wieku. Prowadzone prace na temat „magnetyzmu” zmierzały głównie do poznania zjawiska oddzielania drobin żelaza z wodnej zawiesiny. Wraz z rozwojem przemysłu i zwiększonymi wymaganiami jakościowymi w odniesieniu do surowców i materiałów, zaczęto stosować osiągnięcia nauki w wielu procesach technologicznych. W pierwszych dziesięcioleciach XX wieku zapoczątkowano stosowanie metod separacji magnetycznej do wzbogacania rud żelaza, a także do oczyszczania wody stosowanej w obiegach zamkniętych z zanieczyszczeń ferromagnetycznych. W latach dwudziestych powstał pierwszy prototyp separatora magnetycznego zwanego separatorem bębnowym ze względu na sposób działania. Wykorzystano tu zjawisko przyciągania materiałów ferromagnetycznych przez magnesy trwałe, a w kolejnych latach także przez elektromagnesy prądu stałego. Technologia ta wykorzystywana była w procesach sortowania rud żelaza w hutnictwie. Wraz z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi czystości surowców stosowanych w przemyśle, a także koniecznością pozyskiwania rzadkich pierwiastków opracowano w latach czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku nowe rozwiązania wykorzystujące pola magnetyczne o wysokich gradientach. Pozwoliło to na separację cząstek materiałów o słabych właściwościach paramagnetycznych oraz niewielkich średnicach ziaren.

Do separacji dużych cząstek ferromagnetycznych i paramagnetycznych skutecznie wykorzystywano separatory z magnesami stałymi. Do rozdzielania materiałów para- i diamagnetycznych zastosowano i dotychczas stosuje się wysoko gradientowe separatory typu H GMS (High Gradient Magnetic Separator). Jako źródło siły separującej stosuje się w nich niejednorodne pole magnetyczne o wysokim gradientie. Poprzez wprowadzenie w jednorodne pole materiału w postaci ukształtowanej matrycy uzyskuje się silne niejednorodności pola i efekt przyciągania materiału separowanego do elementów matrycy. Separatory takie są nazywane matrycowymi i powszechnie stosowane obecnie do filtracji zawiesin

materiałów wykazujących właściwości magnetyczne. Istotną wadą tych urządzeń jest konieczność oczyszczania lub wymiany matrycy oraz kilkakrotne powtórzenie procesu w celu uzyskania odpowiedniego efektu.

Przemysłowe zastosowania separatorów magnetycznych wymuszają wysokie wymagania co do wielkości stosowanego pola magnetycznego oraz objętości przestrzeni roboczej. Powoduje to konieczność doskonalenia istniejących konstrukcji oraz opracowania nowych rozwiązań.

Z chwili powstania prototypów pierwszych elektromagnesów z uzwojeniami nadprzewodnikowymi nastąpił zwrot w technologii separacji magnetycznej. O ile separatory konwencjonalne pozwalały uzyskiwać maksymalnie pola rzędu 2T w niewielkich przestrzennych obszarach, to w separatorach nadprzewodnikowych elektromagnesy generowały pola znacznie wyższe - nawet ponad 20 T, o dużych gradientach i w znacznej objętości przestrzeni roboczej. Możliwa stała się separacja cząstek słabo-paramagnetycznych i paramagnetycznych, o średnicach rzędu mikrometrów.

Dzięki zastosowaniu elektromagnesów nadprzewodnikowych powstały nowe konstrukcje separatorów odchylających zwanych OGMS (Open Gradient Magnetic Separation), w których wykorzystuje się silne niejednorodne pole magnetyczne o wysokim gradiencie, w dużej objętości na zewnątrz elektromagnesu. Niejednorodność pola uzyskiwana jest przez odpowiedni układ dwóch lub więcej cewek nawiniętych przewodem nadprzewodnikowym. Separatory OGMS znacznie różnią się w swoim działaniu od separatorów typu HGMS ze względu na ciągłą pracę i duże objętości przestrzeni roboczej. Przepływające w zawiesinie lub w powietrzu cząstki o właściwościach magnetycznych są selektywnie odchylane pod wpływem działania pola magnetycznego i oddzielane od ośrodka.

#### 4.1.2. Właściwości magnetyczne materiałów

W polu magnetycznym cząstki materiałów zachowują się w różny sposób zależnie od ich właściwości fizycznych, a w szczególności od ich właściwości magnetycznych. Magnetyczne właściwości ciał stałych, w tym także i minerałów określa się wielkością zwaną podatnością magnetyczną  $\chi$ , zdefiniowaną następująco:

$$\chi = \mu - 1 = B/B_0 - 1 \quad (4.1.1.)$$

gdzie:

$\mu$  - względna przenikalność magnetyczna (wielkość bezwymiarowa),

$B$  - indukcja magnetyczna w ciele stałym,  $B_0$  - indukcja magnetyczna w próżni

W praktyce częściej używa się wielkości zwanej podatnością magnetyczną właściwą definiowaną następującą formułą:

$$X = \chi/\delta, [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.1.2.)$$

gdzie:  $\delta$  jest gęstością substancji w  $\text{kg}/\text{m}^3$

Właściwości magnetyczne materiału są wypadkową właściwości magnetycznych pierwiastków chemicznych, z których jest zbudowany. Właściwości magnetyczne pierwiastka silnie zależą od temperatury i wynikają z budowy jego

atomu, a głównie ze struktury jego zewnętrznej powłoki elektronowej i są opisywane tzw. wypadkowym momentem magnetycznym definiowanym jako suma wektorowa momentu orbitalnego i spinowego elektronów. Na tej podstawie ciała stałe można podzielić na następujące grupy: [1, 2]:

- **diamagnetyki** np. kwarc  $\text{SiO}_2$ , korund  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , kalcyt  $\text{CaCO}_3$ , dolomit  $\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$ , baryt  $\text{BaSO}_4$ , magnezyt  $\text{MgCO}_3$ , sztaleryt  $\text{ZnS}$ , galena  $\text{PbS}$ , chalkozyn  $\text{Cu}_2\text{S}$ , cyrkon  $\text{ZrSiO}_4$ , rutil  $\text{TiO}_2$ , anhydryt  $\text{CaSO}_4$ , gips  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , skalenie np. ortoklaz (skałen potasowy),  $\text{K[AlSi}_3\text{O}_8]$  lub albit (skałen sodowy),  $\text{Na[AlSi}_3\text{O}_8]$ .
- **paramagnetyki** np. piryt  $\text{FeS}_2$ , marnasyt  $\text{FeS}_2$ , bornit  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ , chalkopiryt  $\text{CuFeS}_2$ , getyt  $\text{FeOOH}$ , almandyn  $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$  (minerał z grupy granatów).
- **antyferromagnetyki** np. hematyt  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ilmenit  $\text{FeTiO}_3$ , syderyt  $\text{FeCO}_3$ , limonit, monacyt  $(\text{Ln})\text{PO}_4$ , turmalin, piroluzyt  $\text{MnO}_2$ .
- **ferrimagnetyki** np. magnetyt  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , maghemit  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , pirotyn  $\text{FeS}$ .
- **ferromagnetyki** np. żelazo rodzime, żelazo-platyna, żelazo-nikiel oraz stopy żelaza jak np. stal.

Właściwości magnetyczne materiałów w znacznym stopniu zależą od obecnych w ich strukturze zanieczyszczeń lub domieszek i zomorficznych pierwiastków "silnie magnetycznych" (wykazujących właściwości ferromagnetyczne) takich jak żelazo, nikiel, kobalt i niektóre lantanowce jak samaryt, dysproz i zwłaszcza terb. Domieszki tych pierwiastków mogą na tyle zmienić właściwości materiału, że np. materiał wykazujący właściwości diamagnetyczne staje się antyferromagnetycznym.

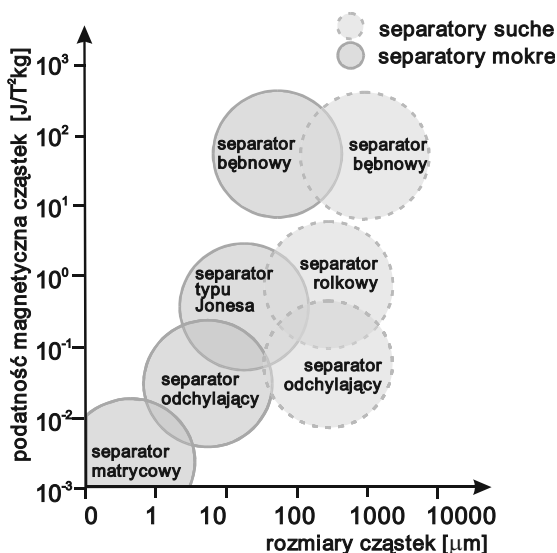
#### 4.1.3. Działanie i klasyfikacja separatorów magnetycznych

Jedną z najważniejszych metod rozdzielania mieszanin materiałów, znajdującą zastosowanie między innymi w przeróbce węgla i uradow mineralnych lub oczyszczaniu cieczy z zanieczyszczeń jest rozdział ziarn lub ich oddzielanie z ośrodka przy wykorzystaniu różnic we właściwościach magnetycznych materiałów - nazywany separacją magnetyczną. W wielu zastosowaniach proces ten jest także nazywany filtracją magnetyczną. Rozdział ten polega na wprowadzeniu mieszaniny materiałów lub cieczy z zanieczyszczeniami w przestrzeń oddziaływania pola magnetycznego, wytworzonego np. pomiędzy biegunami magnesu trwałego lub w przestrzeni wokół lub wewnątrz elektromagnesu. Separatory magnetyczne stosowane są w procesach przemysłowych do oczyszczania kaolinu ze związków tytanu i żelaza, odsiarczania węgla, wzbogacania rud żelaza i molibdenu, oczyszczania wody przemysłowej czy nawet dużych akwenów wodnych. Procesy stosowane w przemyśle warunkują występowanie wielu wymagań stawianych konstrukcjom separatorów, wielkości zastosowanego pola magnetycznego oraz objętości przestrzeni roboczej. Separatory konwencjonalne o niskich wartościach pola magnetycznego (do 2T) i niewielkich przestrzeniach roboczych, są odpowiednie do separacji cząstek ferromagnetycznych oraz silnie paramagnetycznych o niezbyt małych rozmiarach. W procesach wymagających separowania cząstek słabo paramagnetycznych, o rozmiarach rzędu mikronów,

stosowane są separatory matrycowe z dużym gradientem pola magnetycznego. Zastosowanie elektromagnesów nadprzewodnikowych w miejsce elektromagnesów konwencjonalnych zwiększa zakres stosowania istniejących typów separatorów. Uzyskanie silniejszych pól magnetycznych pozwoliło na separację drobnych cząstek o niewielkich różnicach właściwości magnetycznych. Elektromagnesy nadprzewodnikowe posłużyły do budowy nowych typów separatorów.

Separatory magnetyczne można klasyfikować ze względu na szereg parametrów:

- a) wartość stosowanego pola magnetycznego:
  - separatory wysokogradientowe
  - separatory o niskich indukcjach pola magnetycznego
- b) zasadę działania:
  - wychwytyjące np. typu HGMS
  - odchylające np. typu OGMS
- c) zastosowane źródło pola magnetycznego:
  - konwencjonalne z magnesami stałymi lub elektromagnesami z materiałów konwencjonalnych jak miedź czy aluminium
  - nadprzewodnikowe
- d) ciągłość działania wyróżnia się separatory:
  - o działaniu ciągłym
  - o działaniu okresowym



Rys. 4.1.1. Typy separatorów magnetycznych [16]

Najbardziej rozpowszechnione konstrukcje separatorów to separator typu bębnowego, separator kwadrupolowy, prętowy oraz matrycowy.

Separatory magnetyczne typu bębnowego są budowane głównie w oparciu o magnesy stałe i elektromagnesy konwencjonalne, chociaż istnieją też konstrukcje z elektromagnesami nadprzewodnikowymi.

W separatorze bębnowym (Rys.4.1.2) wewnątrz wirującego bębna umieszczone są elektromagnesy lub magnesy stałe. Wytwarzają one niejednorodne pole magnetyczne, które działając na cząstki magnetyczne powoduje ich przyciąganie i osadzanie na jego powierzchni. Są one następnie przemieszczane w kierunku obszaru, w którym pole magnetyczne nie działa i zostają oddzielone od cząstek niemagnetycznych, które nie były przyciągane do bębna. Proces separacji ma charakter ciągły.

W separatorze kwadrupolowym (Rys.4.1.3) źródłem pola magnetycznego działającego na cząstki magnetyczne jest elektromagnes kwadrupolowy, wzdłuż którego umieszczone są dwie współosiowe rury. Cząstki materiału separowanego zostają odchylone w przestrzeni działania silnego pola w kierunku zewnętrznej rury i oddzielone od pozostałego w rurze wewnętrznej ośrodka. Proces separacji jest typu odchylającego i ma charakter ciągły.

Jedynie w separatorach matrycowych (Rys.4.1.4) oraz w separatorze bębnowym stosuje się elektromagnesy z uzwojeniami nadprzewodzącymi. Jedną z bardziej efektywnych konstrukcji jest separator matrycowy. Jest to separator wychwytyjący.

Separator matrycowy charakteryzuje się dużymi gradientami pola magnetycznego. W przeciwieństwie jednak do separatorów odchylających typu OGMS pracują okresowo z przerwami na czyszczenie matrycy, co znacznie utrudnia eksploatację urządzenia.

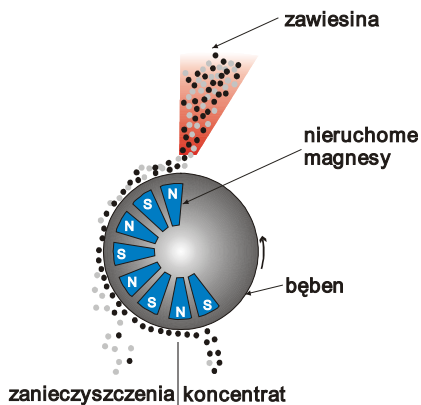
Odmianą separatora matrycowego jest separator karuzelowy (Rys.4.1.5). Na obwodzie separatora - na kole tzw. „karuzeli” umieszczone są w komorach matryce separujące. Koło obraca się w sposób ciągły i kolejne matryce są wprowadzane w obszar silnego pola magnetycznego wytwarzanego przez elektromagnes o kształcie siodła. W każdej matrycy zachodzi kolejno proces wychwytywania cząstek magnetycznych oraz przepłukiwanie matrycy po jej wyjściu z obszaru silnego pola. Taka budowa separatora pozwala na zachowanie ciągłości procesu separacji, ale jego konstrukcja jest bardzo skomplikowana w porównaniu do konstrukcji innych separatorów.

Współcześnie istnieje wiele zastosowań zjawiska separacji magnetycznej w urządzeniach produkowanych na skalę przemysłową i laboratoryjną. Wśród producentów takich urządzeń należy wymienić firmy takie jak Carpco (obecnie Outokumpu), Aquafine, Eriez.

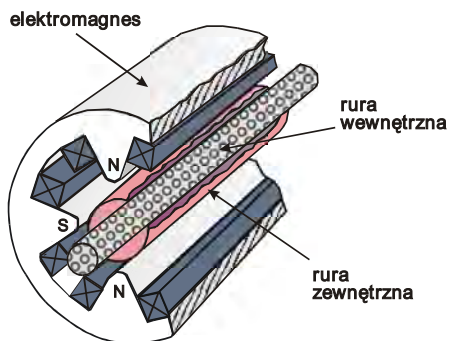
Produkowane systemy stosowane są głównie w procesach wzbogacania rud i oczyszczania wody. W tabeli przedstawiono zestawienie parametrów różnego rodzaju separatorów magnetycznych produkowanych przez amerykańską firmę Carpco.

Na podstawie danych z amieszczonej w tabelicy 4.1.1 można stwierdzić że dzięki osiągnięciu wysokich wartości pola magnetycznego (do 5T) w separatorach magnetycznych z krioelektromagnesami można separować materiały o dużym zakresie rozmiarów cząstek przy jednoczesnej dużej wydajności urządzeń. Są to separatory typu OGMS i HGMS. W przypadku tych urządzeń separowany materiał może charakteryzować się małymi różnicami w podatności magnetycznej, gdyż duże wartości generowanego pola magnetycznego powodują występowanie odpowiednio dużych sił magnetycznych rozdzielających cząstki.

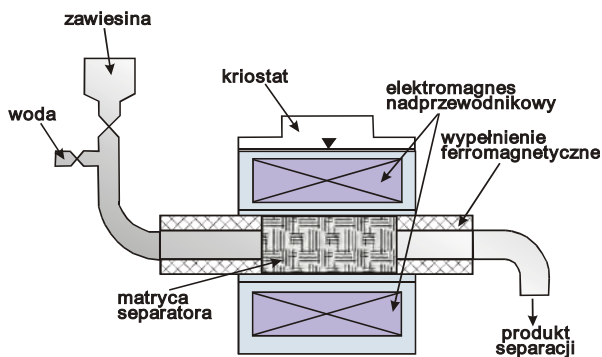




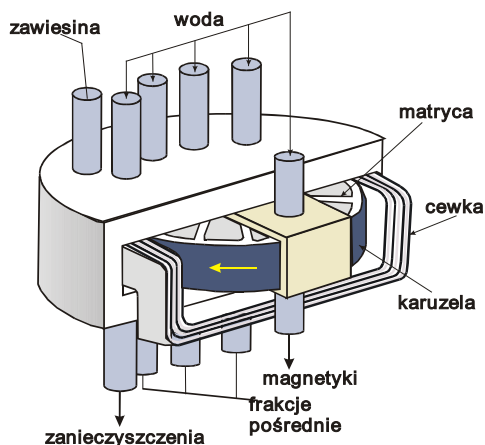
Rys. 4.1.2. Separator bębnowy do wzbogacania rud żelaza



Rys. 4.1.3. Separator kwadropolowy



Rys. 4.1.4. Schemat separatora matrycowego



Rys. 4.1.5. Separator karuzelowy

Tab.4.1.1 Zestawienie separatorów magnetycznych firmy Carpcó [17]

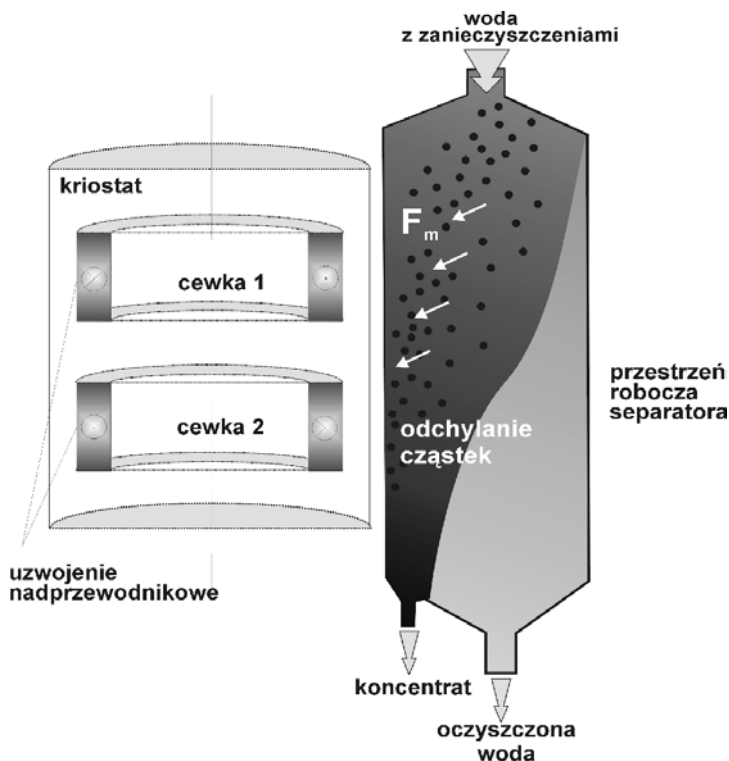
| Separator                             | Rodzaj separacji | Rozmiary cząstek separowanych [mm] | Maksymalna wydajność [kg/godz] | Wartości pola magnetycznego [T] |
|---------------------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Low-Intensity Drum Separator          | Mokra            | 1.0 - 0.03 mm                      | 500                            | 0.005                           |
| Low-Intensity RotatingField Scalper   | Sucha            | 6.0 - 0.074 mm                     | 250                            | 0.005                           |
| High-Intensity Lift-Type Separator    | Sucha            | 0.5 - 0.044 mm                     | 50                             | 0 - 1.6                         |
| High-Intensity Induced-Roll Separator | Sucha            | 1.0 - 0.074 mm                     | 100                            | 0 - 2                           |
| Magforce Rare-Earth Drum Separator    | Sucha            | 12.5 - 0.074 mm                    | 1100                           | 0.1/0.45/0.7                    |
| Wet High-Intensity Magnetic Separator | Mokra            | 0.5 - 0.044 mm                     | 200 gram/wsad                  | 0 - 2                           |
| Cryofilter, High Gradient             | Mokra            | 74 - 0.5 microns                   | 50                             | 0 - 5                           |
| Cryostream, Open Gradient             | Sucha            | 2.0 - 0.074 mm                     | 100                            | 0 - 5                           |
| Cryoflow, High Gradient               | Sucha            | 1.0 - 0.044 mm                     | 50                             | 0 - 5                           |

#### 4.1.4. Separator odchylający typu OGMS

Najczęściej spotykany układ magnetyczny separatora typu OGMS składa się z kilku współosiowych cewek o przekroju prostokątnym, umieszczonych jedna nad drugą. Cewki połączone są tak aby prądy w sąsiednich uzwojeniach płynęły w przeciwnych kierunkach. Wytwarzają one pola magnetyczne przeciwnie skierowane wzdłuż osi symetrii. Schemat działania separatora typu O GMS przedstawia rysunek 4.1.6.

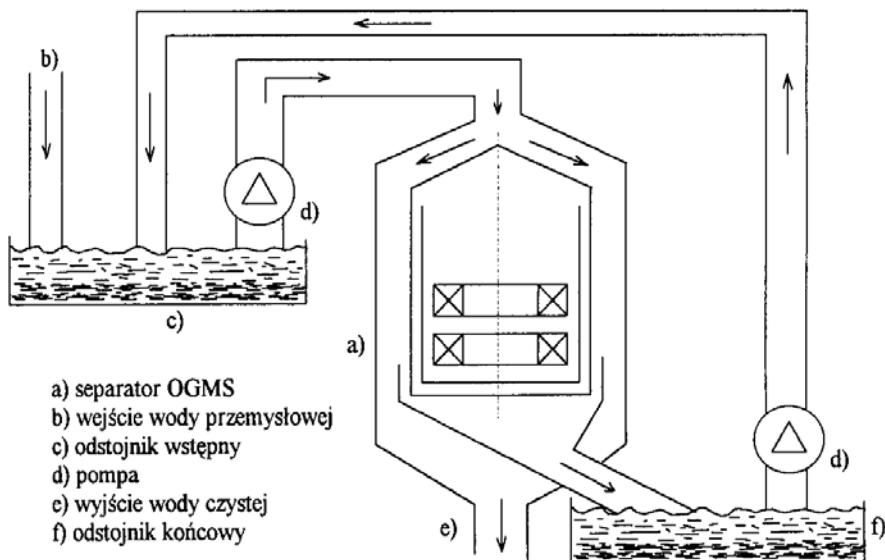
Taki układ magnetyczny wytwarza w przestrzeni wokół elektromagnesu silne niejednorodne pole magnetyczne. Pole to jest źródłem sił magnetycznych działających na cząstki wykazujące właściwości magnetyczne. Cząstki są selektywnie odchylane pod wpływem działania pola magnetycznego i w zależności od podatności magnetycznej, masy i rozmiarów mogą być odpowiednio rozdzielone.

Separatory magnetyczne typu OGMS umożliwiają oczyszczanie wody stosowanej w zakładach przemysłowych takich jak walcownie, huty i inne, gdzie zanieczyszczenia, które dostają się do wody, głównie tlenki i cząstki żelaza, wykazują silne właściwości magnetyczne. Oddziaływanie pola magnetycznego jest na tyle silne, że można uzyskiwać duże wydajności separatora przy zachowaniu wysokiej jakości separacji.



Rys. 4.1.6 Przekrój separatora typu OGMS

Proponowany w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie sposób wykorzystania separatora OGMS w instalacji kompleksowego oczyszczania wody przemysłowej przedstawiony jest na rysunku 4.1.7. Instalacja składa się z zespołu odстойników i separatora OGMS. Woda pozbawiana jest większych zanieczyszczeń w odстойniku wstępnym. Po zmniejszeniu szybkości przepływu wody większe cząstki osiadają na dnie odстойnika wstępnego i są okresowo usuwane w sposób mechaniczny z obiegu wody. Zanieczyszczona woda wychodząca z odстойnika wstępnego zawierająca już tylko drobniejsze cząstki, kierowana jest do separatora OGMS.



Rys.4.1.7. Schemat systemu do oczyszczania wody przemysłowej z prototypem separatora typu OGMS [18]

Oczyszczona część wody, wychodząca z separatora opuszcza instalację oczyszczania. Woda z zanieczyszczeniami, która stanowi 5-10% wody wchodzącej do separatora, kierowana jest do odстойnika końcowego w którym pozostałe zanieczyszczenia osiadają na dnie i zostaną usunięte z obiegu w sposób mechaniczny. Woda z odстойnika końcowego kierowana jest z powrotem do odстойnika wstępnego a stamtąd do separatora. Stężenie zanieczyszczeń w wodzie przemysłowej może dochodzić do 4500 mg/l. Odстойnik wstępny może zmniejszyć stężenie zanieczyszczeń do około 200 mg/l. Pozostałe zanieczyszczenia są już tak małych rozmiarów, że proces ich osadzania trwałby zbyt długo a odстойniki musiałby zajmować bardzo duże obszary. Jeżeli przyjąć, że stężenie zanieczyszczeń w wodzie wpadającej do separatora wynosi 200 mg/l, to stężenie zanieczyszczeń w wodzie wpadającej do odстойnika końcowego może wynosić do 4000 mg/l. Im wyższe stężenie zanieczyszczeń trafiających do odстойnika końcowego, tym mniejszy obszar on zajmuje, co decyduje o kosztach instalacji oczyszczania wody.

Zastosowanie separatora typu OGMS pozwala na wielokrotne zmniejszenie powierzchni zajmowanej przez instalację oczyszczania wody i pracę w obiegu zamkniętym co obniża koszt oczyszczania wody.

#### 4.1.5. Elektromagnesy nadprzewodnikowe dla separatorów OGMS

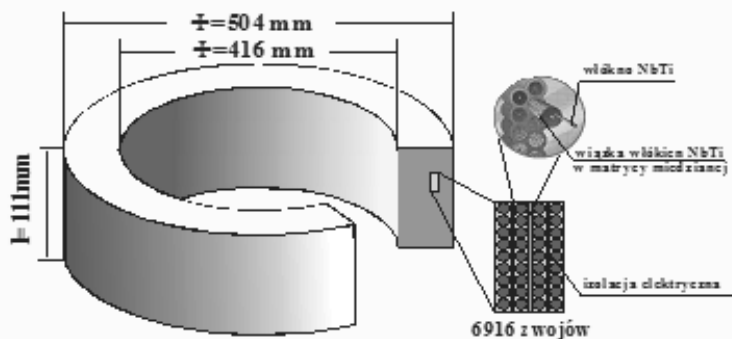
Wytwarzanie silnych pól magnetycznych za pomocą elektromagnesów z uzwojeniem konwencjonalnym jest trudne technicznie i kosztowne w eksploatacji. Pola o indukcjach rzędu kilku tesli generują elektromagnesy w kształcie

bezdzielnym solenoidów z uzwojeniem miedziowym. Gabaryty takich solenoidów są bardzo duże. Uzwojenie ulega dużemu nagrzananiu, co powoduje konieczność zastosowania odpowiednich układów chłodzenia. Takie rozwiązanie jest nieekonomiczne ze względu na powstawanie dużych strat.

Potrzeba ograniczenia strat w elektromagnesach wytwarzających pola magnetyczne o dużych wartościach indukcji spowodowała konieczność poszukiwania nowych rozwiązań. Zaawansowane technologie wytwarzania przewodów nadprzewodnikowych dały możliwość wykorzystania zjawiska nadprzewodnictwa przy budowie uzwojeń elektromagnesów.

Elektromagnes nadprzewodnikowy o wewnętrznej średnicy cewki 3,7 m, indukcji w środku cewki 3,5 T, energii 800 MJ zużywa poniżej 0,37 MW mocy, głównie na chłodzenie. Przy konwencjonalnym uzwojeniu, taki elektromagnes wymagałby zasilania mocą ok. 60 MW. Elektromagnesy nadprzewodnikowe mogą być mniejsze i lżejsze od konwencjonalnych ze względu na małe przekroje przewodów (gęstości prądu o 2 rzędy wielkości większe niż w miedzi), brak rdzeni stalowych (stosowanie żelaza jest zbędne, ponieważ pola uzyskiwane w tych elektromagnesach są dużo wyższe niż pole nasycenia żelaza). Są tańsze w eksploatacji ze względu na znikome straty, co równoważy koszty układów chłodzenia. Do zasilania potrzebne są źródła o wielokrotnie mniejszej mocy.

Zastosowanie uzwojenia wykonanego z drutu nadprzewodnikowego NbTi (Rys 4.1.8) lub Nb<sub>3</sub>Sn pozwala uzyskać silne pola w dużej przestrzeni wokół elektromagnesu dlatego też elektromagnesy nadprzewodnikowe znalazły także zastosowanie w fizyce cząstek elementarnych jako źródła silnego pola magnetycznego skupiającego i odchylającego strumienie cząstek elementarnych.



Rys. 4.1.8. Przykładowa konstrukcja uzwojenia elektromagnesu nadprzewodnikowego

#### 4.1.5.1. Etapy projektowania elektromagnesu nadprzewodnikowego dla separatora OGMS

Efekt procesu projektowania elektromagnesu nadprzewodnikowego jest rozwiązanie zapewniające osiągnięcie żądanej wielkości pola magnetycznego w określonej przestrzeni roboczej elektromagnesu, przy minimalnych gabarytach i ciężarze urządzenia, minimalnej energochłonności (głównie na chłodzenie) i

kosztach budowy oraz maksymalnej niezawodności i bezpieczeństwie urządzenia. Niezależnie od wielkości i konstrukcji elektromagnesu najbardziej istotnym zagadnieniem jest dobór układu chłodzenia, tak aby temperatura robocza uzwojenia nadprzewodnikowego odpowiadała punktowi pracy poniżej charakterystyki krytycznej nadprzewodnika która jest funkcja gęstości prądu, natężenia pola magnetycznego oraz temperatury.

W trakcie projektowania elektromagnesów nadprzewodnikowych dla separatorów OGMS należy uwzględnić:

#### **4.1.5.2. Zakłócenia**

- mechaniczne
- elektryczne
- magnetyczne
- termiczne

Stany nieustalone uzwojenia stanowią odrębne zagadnienie, którego złożony charakter powoduje konieczność stosowania skomplikowanych układów zabezpieczeń. Zjawiska nieustalone są spowodowane przez występowanie zakłóceń o różnym charakterze. Są to zakłócenia magnetyczne, mechaniczne lub elektryczne. Ze względu na duże siły elektromagnetyczne powstające w uzwojeniu w stanie nadprzewodzącym powstają silne naprężenia mechaniczne, które są przyczyną lokalnych stref podwyższonej temperatury w uzwojeniu, co może doprowadzić do przejścia uzwojenia w stan rezystywny. Kolejnym groźnym zjawiskiem jest tzw. przeskok strumienia magnetycznego, który może mieć charakter lawinowy i również doprowadzić do wystąpienia stanu rezystywnego uzwojenia. Zakłócenia elektryczne są powodowane przez indukowanie się dużych spadków napięcia między zwojami elektromagnesu przy znacznych wahaniami prądu. Jest to eliminowane przez izolacje elektryczną poszczególnych zwojów elektromagnesu.

#### **4.1.5.3. System chłodzenia**

W trakcie pracy uzwojenia nadprzewodzącego elektromagnesu najbardziej istotnym parametrem jest temperatura, której wartość decyduje o wystąpieniu lub zaniku stanu nadprzewodzącego. Wprawdzie temperatura krytyczna nadprzewodników drugiego rodzaju wynosi około 25 K, to w praktyce urządzenia nadprzewodnikowe pracują w temperaturze 4,2 K i niższych przy technikach chłodzenia z użyciem ciekłego helu. Temperatura ta może być wyższa (np. 10 K) przy chłodzeniu kontaktowym np. za pomocą kriochłodziarek.

Istotnym elementem w konstrukcji urządzeń nadprzewodnikowych jest odpowiednio dobrana izolacja termiczna od otoczenia, która maksymalnie eliminuje dopływ ciepła z zewnątrz przez promieniowanie, konwekcję i przewodnictwo. Izolację stanowią kriostaty z wielowarstwowymi ekranami z folii aluminiowej oraz ekrany miedziane chłodzone cieczami kriogenicznymi takimi jak hel i azot. Uzupełnieniem izolacji jest także zachowanie wysokiej próżni w niektórych jej warstwach. Dzięki izolacji termicznej możliwa jest eliminacja ciepła dopływającego z zewnątrz kriostatu poprzez doprowadzenia prądowe, czyli przepusty, czujniki pomiarowe oraz ciepła wytwarzanego w uzwojeniu w stanach nieustalonych. Układ chłodzenia odbiera ciepło dopływające do kriostatu z zewnątrz oraz ciepło

wydzielane podczas pracy w stanach przejściowych i ciepło wydzielane na skutek zakłóceń czy ciepło wynikające ze strat przemiennościowych w nadprzewodnikach. Można wyróżnić cztery podstawowe techniki chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych:

- w kąpieli

uzwojenia nadprzewodnikowe do chłodzenia w kąpieli mogą być wykonane z kanałami chłodzącymi lub bez. Jeżeli uzwojenie wykonane jest bez kanałów chłodzących to transport ciepła z wnętrza uzwojenia do brzegu chłodzonego cieczą kriogeniczną odbywa się na drodze przewodnictwa cieplnego

- wymuszone

chłodzenie wymuszone można realizować poprzez przepływ ciekłego czy gazowego helu lub azotu w kanałach chłodzących wewnątrz uzwojenia i po jego powierzchni, w rurkach umieszczonych wewnątrz przewodu nadprzewodnikowego bądź w rurkach nawiniętych na chłodzone uzwojenie.

- kontaktowe

kriochłodziarki pozwalają na całkowite wyeliminowanie cieczy kriogenicznych z układu chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych. Ciepło odbierane jest z uzwojenia nadprzewodnikowego głównie na drodze przewodnictwa cieplnego i poprzez karkas o odpowiednio dużej przewodności cieplnej dopływa do głowicy kriochłodziarki. Wpływ tej techniki chłodzenia na wartość współczynnika zapełnienia uzwojenia  $\lambda_{sc}$  jest więc minimalny.

- hybrydowe, in. chłodzenie w kąpieli ze wspomaganie

zastosowanie techniki kąpieli ze wspomaganie, gdzie uzwojenie zanurzone jest w cieczy kriogenicznej a kriochłodziarka odbiera ciepło od tej cieczy łączy podstawowe zalety techniki chłodzenia w kąpieli wielokrotnie zwiększając czas pomiędzy kolejnymi uzupełnieniami cieczy kriogenicznych, co pozwala na budowanie układów prawie bezobsługowych.

#### **4.1.5.4. Dobór przewodu nadprzewodnikowego**

Kolejnym z zagadnieniem projektowym jest dobór przewodu nadprzewodnikowego, z którego wykonuje się uzwojenie. Na wybór odpowiedniego przewodu wpływa przede wszystkim wymagany rozkład pola magnetycznego w przestrzeni roboczej. Narzucony rozkład pola generowany jest przez przepływ prądu w uzwojeniu. Określony przepływ prądu można realizować poprzez: zmianę grubości przewodu (grubszy przewód - większy prąd roboczy), - liczbę zwojów albo cieńszy przewód (mniejszy prąd roboczy) - większa liczba zwojów. Zwiększanie liczby zwojów powoduje zwiększenie indukcyjności własnej uzwojenia, co jest niekorzystne z uwagi na możliwość powstawania wyższych napięć elektrycznych w stanach nieustalonych. Zmniejszenie liczby zwojów wymaga stosowania grubszych przewodów a więc zwiększenia prądu roboczego uzwojenia co wiąże się z większymi problemami z doprowadzeniem prądu poprzez przepusty prądowe. Średnica przewodu nadprzewodnikowego ograniczona jest zazwyczaj wielkością prądu znamionowego zasilacza współpracującego z uzwojeniem oraz prądem znamionowym przepustów prądowych kriostraty. Ze względu na wzrost indukcyjności wraz ze wzrostem liczby zwojów korzystne jest stosowanie

przewodów możliwie grubych. Dobór przewodu jest ściśle związany z systemem chłodzenia i energii zgromadzonej w uzwojeniu.

Ze względu na konieczność zapewnienia stabilnej pracy i zminimalizowania strat ciepłych przewody nadprzewodnikowe mają złożoną budowę. Nadprzewodnik jest podzielony na włókna o średnicach od ułamka do kilkudziesięciu mikrometrów, umieszczone w matrycy (stabilizatorze) z materiału o dobrej przewodności elektrycznej i cieplnej. Włókna są skręcane i transponowanie w celu zmniejszenia strat od pola zewnętrznego i własnego. Materiałem matrycy może być miedź lub aluminium albo srebro. Stosowane są również bariery wysokorezystancyjne z Cu-Ni na włóknach i wiązkach w celu zmniejszenia strat ciepłych od prądów wirowych. Nadprzewodnik zajmuje więc tylko część całkowitego przekroju przewodu. Skomplikowana budowa wewnętrzna przewodu nadprzewodnikowego ma zminimalizować straty w stanach przejściowych oraz straty przemiennoprądowe.

Przewód nadprzewodnikowy charakteryzują następujące parametry: charakterystyka krytyczna przewodu, średnica przewodu, liczba włókien nadprzewodnikowych, stosunek objętości matrycy do nadprzewodnika  $C_{sc}$ [14]:

$$C_{sc} = \frac{S_p - S_{sc}}{S_{sc}} \quad (4.1.3)$$

gdzie:

$S_p$  jest polem całkowitego przekroju poprzecznego przewodu,

a  $S_{sc}$  – polem przekroju poprzecznego nadprzewodnika w przewodzie.

W uzwojeniach małych urządzeń nadprzewodnikowych o energii mniejszej od 100 kJ stosuje się przewody o przekroju kołowym o współczynniku miedzi do nadprzewodnika  $C_{sc}$  od 1 do 2. W urządzeniach nadprzewodnikowych o energii od 100 kJ do 1 MJ stosuje się zarówno przewody o przekroju kołowym jak i prostokątnym o współczynniku  $C_{sc}$  powyżej 2. W uzwojeniach dużych urządzeń nadprzewodnikowych o energiach powyżej 1 MJ stosuje się głównie przewody nadprzewodnikowe w postaci taśm o współczynniku  $C_{sc}$  powyżej 7.

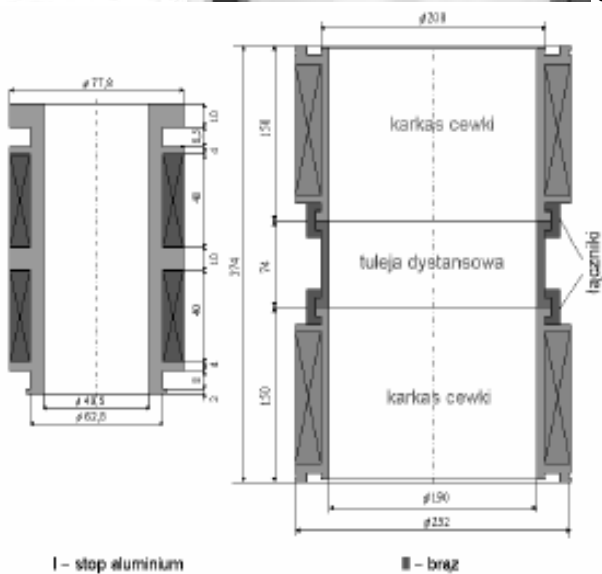
Dla urządzeń nadprzewodnikowych dobiera się przewody nadprzewodnikowe z różnych materiałów w zależności od wartości pól magnetycznych jakie mają być generowane przez wykonane z nich uzwojenia. Dla pól o wartościach indukcji do 8T dobierane są przewody wykonane z NbTi, dla 16 T - Nb<sub>3</sub>Sn, od 13 T do 18 T - V<sub>3</sub>Ga, or az od powiednio od 18 T do 3 0 T – przewody N b<sub>3</sub>Al i N b<sub>3</sub>(Al,Ge)[14]. Taśmy z nadprzewodników wysokotemperaturowych Bi-2212, B i-2223 or az ceramiki YBCO są stosowane w urządzeniach gdzie wartości indukcji pola sięgają 60 T.

#### 4.1.5.5. Zagadnienia mechaniczne

Istotnym problemem występującym w trakcie projektowania elektromagnesów nadprzewodnikowych jest dobór konstrukcji wsporczych i impregnacji uzwojenia. Duże gęstości prądów płynących w uzwojeniu są przyczyną powstawania znacznych sił elektromagnetycznych wielokrotnie większych niż w elektromagnesach konwencjonalnych. Ponieważ wytrzymałość materiałów uzwojenia jest większa w temperaturach helowych o ok. 30%, a wytrzymałość



przewodu nadprzewodnikowego - NbTi jest wyższa od wytrzymałości miedzi prawie czterokrotnie, siły te stanowią poważne zagrożenie mechaniczne dla konstrukcji wsporczych i uzwojeń elektromagnesów.



Rys. 4.1.9. Widok i przekroje elektromagnesów nadprzewodnikowych do pracy w modelu separatora typu OGMS wykonanych w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie .

Aby wyeliminować przemieszczenia uzwojeń pod wpływem wielkich sił, wzmocnienia się je obręczami lub poprzez "bandażowanie" taśmą izolacyjną albo poprzez impregnację żywicą epoksydową. Dobór odpowiednich materiałów tak, aby spodziewane naprężenia wywołane siłami elektromagnetycznymi nie przekroczyły poziomu wytrzymałości przewodu zapobiega jego uszkodzeniu.

Obliczenia wytrzymałościowe dotyczące sił elektromagnetycznych są analogiczne jak w przypadku elektromagnesów konwencjonalnych. Różnica polega na większych wartościach tych sił oraz braku wystarczających informacji na temat właściwości mechanicznych materiałów w temperaturach ciekłego helu, w szczególności w przypadku tzw. zmęczenia materiału. Dotyczy to bardziej złożonych materiałów jak przewody nadprzewodnikowe, ale także stali nierdzewnej czy brązu. Oprócz sił elektromagnetycznych występujących podczas pracy elektromagnesu, które powodują powstawanie naprężeń dynamicznych, uzwojenia i konstrukcje wsporcze narażone są na naprężenia statyczne, które pojawiają się po schłodzeniu elektromagnesu od temperatury pokojowej do temperatury roboczej. Przyczyną tych naprężeń jest nierównomierne kurczenie się różnych materiałów, wchodzących w skład uzwojenia, pod wpływem temperatury na skutek różnych współczynników ściśliwości termicznej materiałów.

#### **4.1.6. Proces separacji magnetycznej w separatorze typu OGMS**

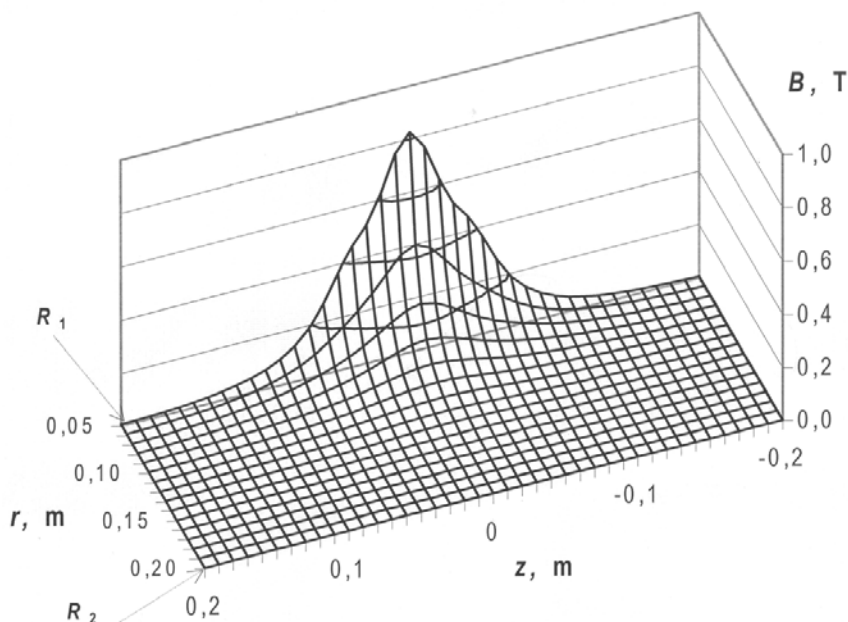
Separacja magnetyczna, zwłaszcza oparta na odchyłaniu cząstek w polu magnetycznym, zależy przede wszystkim od rozkładu tego pola w obszarze roboczym separatora. Odpowiednie charakterystyki pola, wartości indukcji oraz niejednorodności, są jednym z podstawowych kryteriów ustalania stopnia efektywności selektywnego rozdzielania cząstek ze względu na ich parametry magnetyczne i geometryczne. Podstawowym elementem decydującym o pracy separatora magnetycznego jest uzwojenie nadprzewodzące elektromagnesu. Podczas projektowania elektromagnesu nadprzewodnikowego jako źródła pola magnetycznego w separatorze OGMS poszukiwane jest takie rozwiązanie, które zapewnia osiągnięcie odpowiedniej wielkości i rozkładu parametrów pola magnetycznego w określonej przestrzeni roboczej magnesu, przy minimalnym ciężarze i gabarytach urządzenia, minimalnym zużyciu energii elektrycznej (głównie na chłodzenie systemu), minimalnych kosztach inwestycyjnych przy jednoczesnej maksymalnej niezawodności i bezpieczeństwie pracy urządzenia.

Modelowanie procesu separacji odchylającej wymaga dokładnego określenia pola magnetycznego oraz jego gradientu w każdym punkcie trajektorii cząstki. Wymaganie to jest związane z wyznaczaniem drogi, po jakiej porusza się dana cząstka, między innymi pod wpływem siły zależnej od tego pola.

Najczęściej konstrukcja separatorów odchylających jest oparta na układach, w których pole magnetostatyczne generowane jest przez różne konfiguracje solenoidów prostych (dipolowe, multidipolowe, kwadrupolowe, oktopolowe itp.). Z dotychczasowych badań teoretycznych weryfikowanych wielokrotnie w trakcie eksperymentów wynika, że dla opracowanego modelu separatora magnetycznego typu OGMS najkorzystniejszy jest elektromagnes zbudowany z dwóch identycznych cewek współosiowych.

Na Ry s. 4.1.10 przedstawiony jest rozkład indukcji pola magnetycznego generowanego przez dwa cewki elektromagnesu nadprzewodnikowy w

separatorze typu OGMS. Pole jest najsilniejsze i jego gradient jest największy po wewnętrznej stronie przestrzeni roboczej i maleje ze wzrostem odległości od osi elektromagnesu. Tak ukształtowane pole magnetyczne odchyła cząstki o właściwościach ferromagnetycznych i paramagnetycznych, które poruszają się w strumieniu materiału w kierunku środka elektromagnesu.



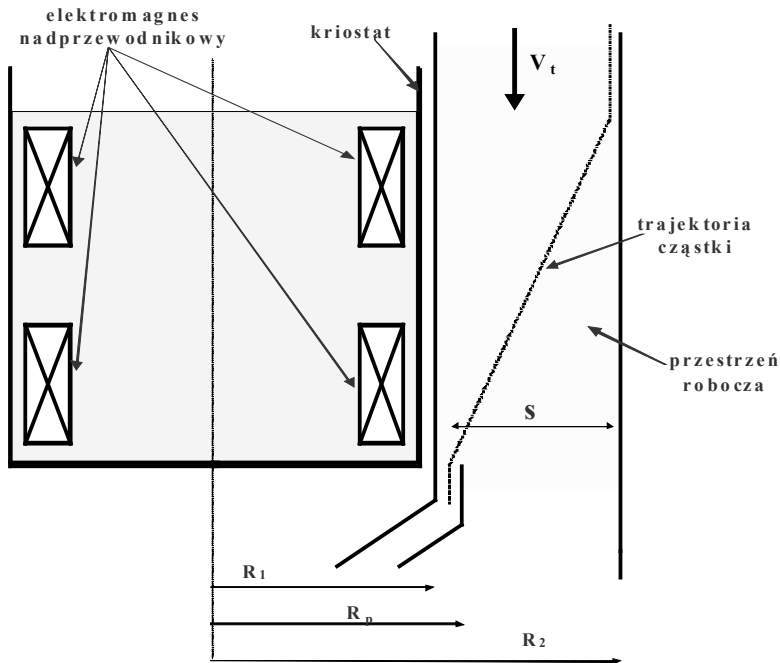
Rys.4.1.10. Pole magnetyczne generowane przez elektromagnes separatora typu OGMS [14]

Rysunek 4.1.11 przedstawia zasadę działania separatora O GMS do oczyszczania wody. Woda zanieczyszczona cząstkami magnetycznymi w postaci strumienia zawiesiny wpływa do separatora z prędkością  $V_1$  poprzez przestrzeń pomiędzy cylindrem wewnętrznym (promień  $R_1$ ) a zewnętrznym (promień  $R_2$ ). Cząstki magnetyczne poddane działaniu pola magnetycznego są odchylane od prostoliniowego toru i rozdzielane w trakcie wychodzenia z separatora. Oczyszczona woda wypływa z separatora przestrzenią pomiędzy cylindrem podziału (promień  $R_p$ ) a cylindrem zewnętrznym ( $R_2$ ). Zanieczyszczenia z częścią wody opuszczają separator przestrzenią pomiędzy cylindrem wewnętrznym ( $R_1$ ) a cylindrem podziału ( $R_p$ ).

W procesie separacji magnetycznej ważną rolę odgrywają następujące parametry:

- natężenie pola magnetycznego w przestrzeni roboczej separatora,
- podatność magnetyczna rozdzielanych materiałów,
- wielkość cząstek separowanego materiału,

- opory ruchu wywołane siłami grawitacji i tarcia,



Rys.4.1.11. Schemat działania separatora typu OGMS.

Siłę działającą na cząstki można wyrazić sumą sił magnetycznych  $F_m$  i niemagnetycznych  $F_{nm}$ :

$$F = F_m + F_{nm} = F_m + F_g + F_d \quad (4.1.4)$$

Siły niemagnetyczne to:

$$\text{Siła grawitacji: } \vec{F}_g = \frac{4\pi}{3} \cdot \delta \cdot \vec{g} \cdot R_c^3 \quad (4.1.5)$$

$$\text{Siła hydrodynamiczna: } \vec{F}_d = -6\pi \cdot \eta \cdot R_c \cdot (\vec{v} - \vec{v}_t) \quad (4.1.6)$$

$$\text{Siła magnetyczna: } \vec{F}_m = \frac{4\pi \cdot \chi \cdot R_c^3}{3\mu_0(\chi + 1)} \cdot \Delta(B^2) \quad (4.1.7)$$

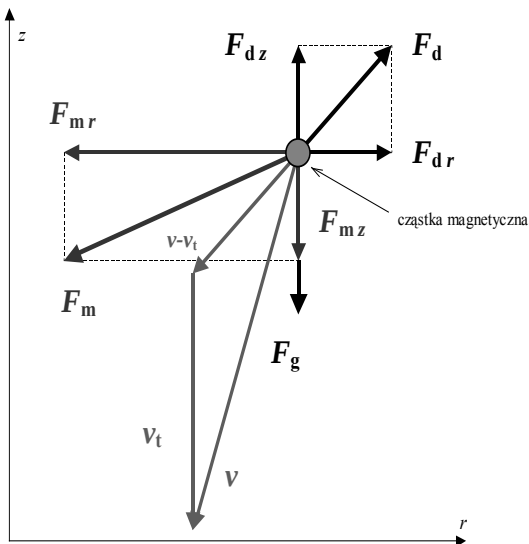
gdzie:

$R_c$  – promień cząstki;  $\delta$ - gęstość cząstki;

$g$  – przyspieszenie grawitacyjne;  $\eta$ - wsp. lepkości ośrodka;

$v_t$  - prędkość ośrodka;  $v$  - prędkość cząstki;

$\chi$  - podatność magnetyczna cząstki,  $B$  - indukcja magnetyczna,  $\mu_0 - 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$



Rys. 4.1.12. Siły działające na cząstkę w separatorze typu OGMS

O odchyleniu cząstek decyduje składowa promieniowa siły magnetycznej  $F_{mr}$ , która bezpośrednio zależy od składowej promieniowej indukcji magnetycznej  $B_r$ . Składowa ta osiąga maksymalne wartości w obszarze między cewkami elektromagnesu.

Układ magnetyczny separatora OGMS posiada symetrię obrotową wobec czego składowe: radialna i osiowa siły magnetycznej można wyrazić następującymi zależnościami [18]:

$$\vec{F}_{mr}(r, z) = \frac{\chi \cdot V_b}{\mu_0(\chi + 1)} \cdot \frac{\partial B^2(r, z)}{\partial r} \quad (4.1.8)$$

$$\vec{F}_{mz}(r, z) = \frac{\chi \cdot V_b}{\mu_0(\chi + 1)} \cdot \frac{\partial B^2(r, z)}{\partial z}$$

Siła magnetyczna jest więc proporcjonalna do  $\nabla(B^2)$ , a składowa radialna i osiowa siły magnetycznej są proporcjonalne odpowiednio do:  $\partial(B^2) / \partial r$  i  $\partial(B^2) / \partial z$ .

#### 4.1.6.1. Dobór parametrów uzwojeń elektromagnesu separatora OGMS pod kątem przebiegu procesu separacji magnetycznej.

Przy projektowaniu separatorów magnetycznych typu OGMS zmierzają do uzyskania maksymalnej wydajności procesu separacji przy minimalnych kosztach. Dla warunków separacji mokrej wydajność  $W$  może być zdefiniowana w następujący sposób [18]:

$$W = \pi \cdot v_t \cdot ((R_p + s)^2 - R_p^2) \quad (4.1.9)$$

przy założeniu, że  $R_p = R_2 - s$ ,

gdzie:

$R_2$  - promień zewnętrzny cylindra separatora,

$R_p$  - promień cylindra podziału,  $s$  - całkowite odchylenie cząstki,

$v_t$  - prędkość transportu ośrodka.

Wydajność  $W$ , podobnie jak całkowite odchylenie cząstek  $s$ , jest funkcją szeregu zmiennych:

$$W = f(F_m, v_t, \eta, \chi, \delta, R_c, f_u, R_1, R_2, R_p) \quad (4.1.10)$$

gdzie:

$F_m$  - siła magnetyczna działająca na cząstki,

$R_c$  - promień cząstki;  $\delta$  - gęstość cząstki;

$g$  - przyspieszenie grawitacyjne;  $\eta$  - współ. lepkości ośrodka;

$v_t$  - prędkość ośrodka;  $\chi$  - podatność magnetyczna cząstki,

$f_u$  - współczynnik upakowania cząstek w strumieniu;  $B$  - indukcja magnetyczna,

Siła magnetyczna  $F_m$  która działa na cząstki separowanego materiału jest funkcją wielu zmiennych:

$$F_m = f(r, z, \sum_{k=1}^n (R_w(k), R_z(k), b(k), a(k), J(k))) \quad (4.1.11)$$

gdzie:

$n$  - liczba cewek;  $r, z$  - współrzędne cząstki w trakcie separacji;

$R_w, R_z$  - promień wewnętrzny i zewnętrzny cewki;

$b$  - długość cewki;  $a$  - osiowa współrzędna środka cewki;

$J$  - średnia gęstość prądu w cewce

Średnia gęstość prądu w cewce zależy od przewodu nadprzewodnikowego użytego do wykonania cewek oraz systemu chłodzenia i sposobu wykonania uzwojeń:

$$J = f(C_{sc}, \phi, \lambda, I_k = f(B_k)) \quad (4.1.12)$$

gdzie:

$C_{sc}$  - stosunek miedzi do nadprzewodnika w przewodzie;

$\phi$  - średnica przewodu;  $\lambda$  - współczynnik wypełnienia uzwojenia;

$I_k = f(B_k)$  - charakterystyka kryt. przewodu nadprzewodnikowego

Biorąc pod uwagę powyższe zależności oraz uwzględniając zasady budowy i doboru parametrów elektromagnesu parametry separatora OGMS można podzielić na cztery grupy:

- parametry strumienia cząstek :  $\eta, \chi, \rho, R_c, f_u$
- parametry procesu separacji :  $v_t, R_1, R_2, R_p$
- parametry przewodu nadprzewodnikowego :  $C_{SC}, \phi, \lambda, I_k = f(B_k)$
- parametry elektromagnesu :  $R_w, R_z, b, a, J$

Zmieniając poszczególne grupy parametrów elektromagnesu i całego separatora można kształtować rozkład pola magnetycznego i tym samym wpływać na wydajność separacji.

Na podstawie literatury można stwierdzić że we wszystkich stosowanych konstrukcjach separatorów OGMS stosuje się pole symetryczne - obie cewki mają ten sam kształt a różnią się tylko kierunkiem prądu w cewkach. Charakterystyka procesu odchylenia cząstek w separatorze pokazuje, że można zwiększyć całkowite odchylenie cząstki przez zastosowanie pola ni esymetrycznego - wzmocnienie pola w początkowym biegu cząstki, kosztem jego osłabienia przy wyjściu cząstki z separatora. Współczynnik niesymetrii układu magnetycznego określony jest przez stosunek masy przewodu nadprzewodnikowego pierwszej cewki do masy przewodu obu cewek. Układ jest symetryczny gdy współczynnik niesymetrii jest równy 0.5.

Analiza rozkładu pola w przestrzeni roboczej separatora pozwala wyciągnąć wniosek, że o wydajności separacji w przypadku cząstek paramagnetycznych decyduje przede wszystkim maksymalna wartość pola magnetycznego, a w przypadku cząstek ferromagnetycznych zasięg działania pola magnetycznego. Stąd więc optymalne układy magnetyczne dla cząstek paramagnetycznych są bardziej zwarte - cewki grubsze położone bliżej siebie. Optymalne układy magnetyczne dla separacji cząstek ferromagnetycznych to cewki cieńsze i zdecydowanie bardziej oddalone niż w przypadku cząstek paramagnetycznych. Również mniejsza wymagana niesymetria w przypadku cząstek paramagnetycznych świadczy o decydującym wpływie wartości pola magnetycznego, a mniejszym wpływie zasięgu działania silnego pola. Dla cząstek ferromagnetycznych, ze względu na ich dużą podatność magnetyczną, nawet stosunkowo słabe pole magnetyczne może zmienić trajektorię cząstki. Niesymetria pola powodująca nieznaczne zmiany rozkładu pola ma więc w tym przypadku większy wpływ na wydajność.

#### 4.1.7. Przemysłowe instalacje separatorów magnetycznych

Zalety separatorów magnetycznych z budowanych w oparciu o nadprzewodnikowe źródło pola magnetycznego powodują, że zostało opracowanych wiele instalacji przemysłowych oferowanych na całym świecie do zastosowań w przemyśle metalurgicznym, wydobywczym i innych. Separator magnetyczne stosowane są w procesach oczyszczania kaolinu ze związków tytanu i żelaza, odsiarczania węgla, wzbogacania rud żelaza i molibdenu, oczyszczania wody przemysłowej czy nawet dużych akwenów wodnych. Zastosowanie elektromagnesów nadprzewodnikowych w miejsce elektromagnesów konwencjonalnych zwiększa zakres stosowania istniejących typów separatorów.

Pierwszy elektromagnes nadprzewodnikowy LTS zainstalowano w

separatorze przemysłowym w USA w roku 1986 (J.M. Huber Company). Jest to instalacja do oczyszczania kaolinu o średnicy roboczej 2,1 m pracująca w systemie z jedną matrycą. Elektromagnes chłodzony jest ciekłym helem w obiegu zamkniętym ze skraplarką helu. Do chwili obecnej uruchomiono w USA 12 podobnych instalacji przemysłowych separatorów nadprzewodnikowych z elektromagnesami LTS, z czego w 8 instalacjach elektromagnesy nadprzewodnikowe zastąpiły elektromagnesy konwencjonalne. 5 dał szych przemysłowych separatorów z elektromagne sami LTS pracuje w Australii, Brazylii, Chinach, Anglii i w Niemczech, wszystkie do oczyszczania glinki kaolinowej. 12 instalacji z USA i 5 z innych krajów pracuje w systemie z jedną matrycą. Matryca jest czyszczona po wyłączeniu prądu w elektromagnesach. W 1989 roku w Wielkiej Brytanii [26] uruchomiono przemysłową instalację separatora HGMS pracującą w systemie z w ymiennymi m atrycami, gdzie zapelniona matryca wyciągana jest z obszaru działania silnego pola magnetycznego i tam czyszczona, a w jej miejsce wprowadza się automatycznie czystą matrycę. W separatorze tym pracuje elektro magnes z Nb-Ti chłodzony techniką w kąpieli ciekłego helu. Średnica przestrzeni roboczej wynosi 0,28 m, indukcja magnetyczna w środku wynosi 4 T, a wydajność od 2 do 5 ton kaolinu na godzinę. Od 1992 roku podobnego typu s eparator przemysłowy do oczyszczania kaolinu działa w Niemczech. Jego par ametry t o: średnica przestrzeni roboczej = 0,26 m, indukcja w środku = 5 T, wydajność do 5 t/h. Do chwili obecnej działa na całym świecie 15 przemysłowych separatorów magnetycznych HGMS z elektromagnesami LTS pracujących w systemie z wymiennymi matrycami oraz 10 dalszych mniejszej skali.

Największym separatorem HGMS z wymiennymi matrycami i elektromagnesem LTS jest separator o średnicy roboczej 1 m i indukcji magnetycznej 5 T. CARPCO [84] oferuje separatory HGMS do separacji suchej i mokrej zanieczyszczeń o granulacji poniżej 75  $\mu\text{m}$  w polu magnetycznym o indukcji do 5 T wytwarzanym przez elektromagnesy LTS.

### **Cryofilter® superconducting magnetic separator**

Cryofilter® jest i instalacją oferowaną przez firmę Outotec do oczyszczania materiałów z zanieczyszczeń magnetycznych. Instalacja zbudowana jest w oparciu i separator typu HGMS z elektromagnesem niskotemperaturowym.

Tablica 4.1.2. Zestawienie parametrów instalacji AMS-400

|                                                                         |                                                                                                                                                                                          |     |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Typ procesu                                                             | Separacja mokra HGMS                                                                                                                                                                     |     |
| Zastosowanie                                                            | Oczyszczanie: kaolinu, węglików, talku, miki i innych minerałów w postaci zawiesiny<br><75 $\mu\text{m}$ (< 200mesh) średnica ziaren<br>Materiały gruboziarniste (do 200 $\mu\text{m}$ ) |     |
| Maksymalna indukcja pola magnetycznego generowanego przez elektromagnes | Cryofilter® Reciprocating Canister System                                                                                                                                                | 5 T |
|                                                                         | Cryofilter® Static Canister Rapid Ramp System                                                                                                                                            | 3T  |





Rys. 4.1.13. Widok kompletnej instalacji Cryofilter® HGMS

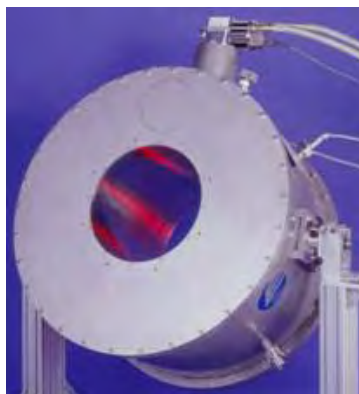
Zastosowano tu opatentowane rozwiązania wielosekcyjnych kanistrów separujących zapewniających prawie bezprzerwowy proces separacji przy niskim poborze mocy. Materiał jest separowany z zawiesiny. Instalacja dedykowana jest do oczyszczania kaoliiu.

#### **Instalacja AMS-400 Accel Magnetic Separator**

Instalacja separatora typu H GMS AMS-400 wykorzystuje chłodzenie za pomocą kriochłodziarki i przepusty prądowe HTS. Wyeliminowano całkowicie ciecze kriogeniczne co skutkuje kompaktową konstrukcją elektromagnesu nadprzewodnikowego HTS. Czas pracy ciągłej układu chłodzącego określono na 10 000 godzin.



a



b

Rys. 4.1.14. Widok kompletnej instalacji (a) oraz elektromagnesu (b) separatora AMS-400

Tablica 4.1.2. Zestawienie parametrów instalacji AMS-400

| Zawartość zanieczyszczeń | Wydajność separacji przy przepływie 70 m <sup>3</sup> /h                                                                                                 |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10%                      | 5 t/h                                                                                                                                                    |
| 20%                      | 11 t/h                                                                                                                                                   |
| 30%                      | 17 t/h                                                                                                                                                   |
| 40%                      | 25 t/h                                                                                                                                                   |
| Typ procesu              | Separacja mokra HGMS                                                                                                                                     |
| Zastosowanie             | Oczyszczanie: kaolinu, węglików, talku, miki i innych minerałów w postaci zawiesiny<br>1 – 30 µm średnica ziaren<br>Materiały gruboziarniste (do 200 µm) |
| Elektromagnes            | HTS bezpośrednio chłodzony ,<br>średnica otworu 430 mm                                                                                                   |
| Chłodzenie               | Kriochłodziarka o mocy 10 KW                                                                                                                             |
| Ciężar instalacji        | 8 t                                                                                                                                                      |
| Wymiary                  | 3.5m x 1.5m x 1.5m                                                                                                                                       |

Instalacja jest przeznaczona głównie na potrzeby procesów oczyszczania kaolinu a także oczyszczania takich materiałów jak talk, mika i węgliki. Materiał jest separowany z zawiesiny wodnej.

#### 4.1.8. Podsumowanie

W separatorach odchylających, w których niejednorodne pole magnetyczne generowane jest przez odpowiednio skonfigurowany elektromagnes, indukcja magnetyczna może osiągać gradient rzędu 100 T/m. Praca tego typu separatora polega na selektywnym odchyłaniu części różnych materiałów w zależności od ich podatności magnetycznej i rozmiarów. Jednym z separatorów odchylających jest separator typu OGMS (Open Gradient Magnetic Separation). Budowa efektywnych separatorów OGMS stała się możliwa dopiero przy wykorzystaniu elektromagnesów nadprzewodnikowych, które pozwalają na generowanie silnych pól magnetycznych w dużych przestrzeniach roboczych.

Przestrzeń robocza separatora HGMS znajduje się wewnątrz elektromagnesu nadprzewodnikowego. Aby zwiększyć przestrzeń roboczą takiego separatora oraz jego wydajność, należy zwiększyć średnicę elektromagnesu nadprzewodnikowego. Elektromagnesy separatorów HGMS umieszczane są w skomplikowanych kriostatach z ciepłym otworem. Dodatkowo w prostym separatorze HGMS nie można zapewnić ciągłości pracy, co jakiś czas matryca separatora musi zostać oczyszczona z wychwyconych na niej zanieczyszczeń.

Czyszczenie matrycy odbywa się przy wyłączonym polu magnetycznym lub po wyciągnięciu matrycy z silnego pola magnetycznego zapewnić ciągłość pracy stosuje się pracę z dwoma separatorami, które pracują i są czyszczone na zmianę,

albo matrycowy separator karuzelowy o bardzo skomplikowanym systemie matryc i elektromagnesie siodłowym o złożonej budowie. Przerwy w pracy można znacznie ograniczyć w systemie pracy z wymiennymi matrycami [ 79]. Wszystkie te wady separatora HGMS rekompensowane są przez bardzo duże gradienty indukcji magnetycznej w przestrzeni roboczej. Pozwala to na prowadzenie skutecznej separacji cząstek o bardzo słabych właściwościach magnetycznych i średnicach poniżej 1  $\mu\text{m}$ .

Elektromagnesy nadprzewodnikowe separatorów OGMS mają najprostszą budowę spośród wszystkich separatorów odchylających. Umieszczone są w prostych kłopotach na czyniowych. Separacja odbywa się w przestrzeni na zewnątrz elektromagnesów. Przestrzeń ta jest więc ograniczona tylko zasięgiem działania sił magnetycznych działających na separowane cząstki. Separacja magnetyczna OGMS odbywa się w sposób ciągły bez udziału ruchomych części i potrzeby o kresowego usuwania zanieczyszczeń. Ciągłość pracy eliminuje konieczność dublowania instalacji, która przejmowałaby pracę w przerwach pierwszej. Te cechy mają bardzo istotne znaczenie, zwłaszcza w dużych instalacjach przemysłowych i mogą decydować o kosztach i opłacalności stosowania separatorów nadprzewodnikowych.

Ograniczeniem w stosowaniu separatorów odchylających OGMS są maksymalne parametry pola magnetycznego możliwe do uzyskania w przestrzeniach roboczych. Wartości tych parametrów, zwłaszcza gradientu indukcji magnetycznej, pozwalają na prowadzenie skutecznej separacji cząstek ferromagnetycznych i cząstek silnie paramagnetycznych o średnicach powyżej 10  $\mu\text{m}$ . Jednym z procesów, w którym separacja magnetyczna typu odchylającego znajduje zastosowanie, jest oczyszczenie hutniczej wody przemysłowej. Wynika to z charakteru zanieczyszczeń, głównie związków żelaza czy cząstek żelaza oraz odpowiednio dużej granulacji tych cząstek.

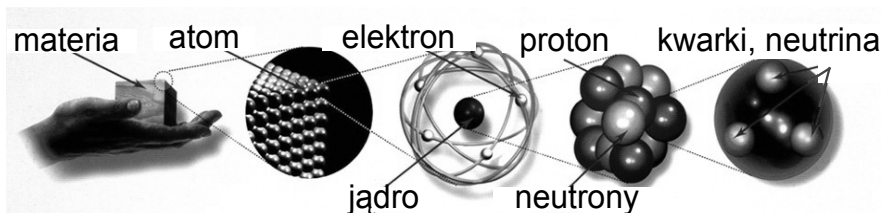
## **4.2. *Elektromagnesy nadprzewodnikowe akceleratorów cząstek elementarnych***

### **4.2.1. Wprowadzenie**

Wiele obecnie przeprowadzanych eksperymentów fizycznych związanych z badaniem materii wymaga zastosowania silnych pól magnetycznych, niezbędnych w procesie detekcji cząstek elementarnych. W CERN-ie powstał największy na świecie akcelerator kołowy LHC – Large Hadron Collider zbudowany całkowicie w oparciu o elektromagnesy nadprzewodnikowe: dipole i kwadrupole oraz elektromagnesy korekcyjne. Innym z zastosowaniem nadprzewodników w CERN-ie są nadprzewodnikowe przepusty prądowe, służące do zasilania elektromagnesów nadprzewodnikowych.

Europejska Organizacja Badań Jądrowych – CERN jest największym w świecie laboratorium fizyki cząstek elementarnych. Fizyka cząstek elementarnych opisuje fundamentalną strukturę oraz właściwości materii w ramach teoretycznego opisu zwanego Modelem Standardowym. Model ten uwzględnia wszystkie znane cząstki oraz siły przyrody, dzięki którym one oddziałują, poza grawitacją. Mimo to, w swej obecnej postaci nie jest on opisem ostatecznym, gdyż

wciąż pozostawia niewyjaśnione zagadki dotyczące struktury materii. Każda materia zbudowana jest z pojedynczych atomów. Jądra atomowe zbudowane są z protonów i neutronów, które z kolei składają się z kwarków i neutrino.



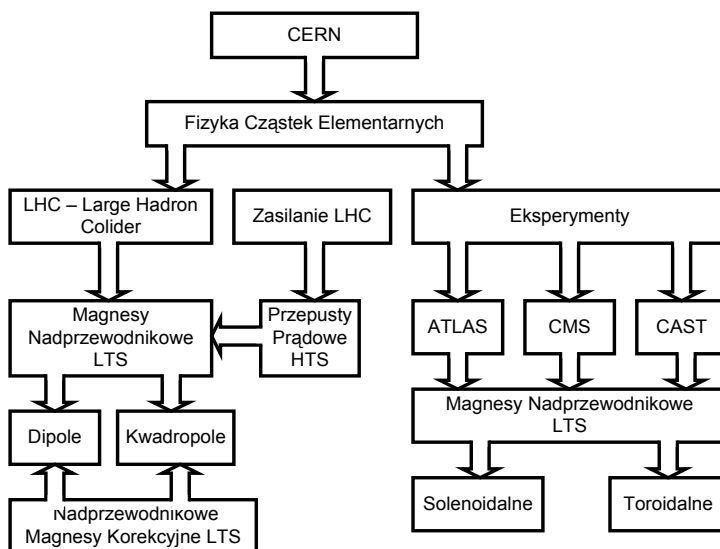
Rys.4.2.1. Uproszczony schemat budowy materii

Mimo, że są to wszystkie „składniki” jakich potrzeba aby zbudować stabilną materię, to jednak wysokoenergetyczne procesy zachodzące w sposób naturalny we Wszechświecie lub sztucznie generowane w laboratoriach, takich jak CERN, produkują dużą różnorodność krótko żyjących cząstek, takich jak: dodatkowe kwarki i neutrino, miony, piony, cząstki Higgsa (bozony Higgsa) i inne, których zaobserwowanie i dokumentowanie oraz poznanie oddziaływań w których one uczestniczą jest jednym z głównych zadań CERN-u. Wszystko to ma na celu znalezienie odpowiedzi jak zmieniła się materia we Wszechświecie - szczególnie w pierwszych sekundach Wielkiego Wybuchu, około  $15 \times 10^9$  lat temu.

#### 4.2.2. Zastosowanie nadprzewodników w CERNie

Do detekcji cząstek elementarnych oraz przyspieszania i ogniskowania wiązek, niezbędne jest pole magnetyczne, wytwarzane przez elektromagnesy detektorów oraz akceleratorów. W CERN-ie powstał akcelerator LHC, w latach 1989 – 2000 wykorzystywano akcelerator LEP – Large Elektron – Positron Collider, zbudowany w oparciu o elektromagnesy konwencjonalne. Pozwalał on osiągać pole magnetyczne w centrum wiązki protonowej rzędu 2 - 3 T, oraz maksymalnej energii wiązki 105 GeV. Obecnie uruchamiany akcelerator LHC pozwoli osiągnąć energię wiązki rzędu 7 TeV. Możliwe jest to dzięki zastosowaniu elektromagnesów nadprzewodnikowych, o polu roboczym 8,3 T i bardzo dużej jednorodności. Uzyskanie takiego pola magnetycznego przy użyciu elektromagnesów konwencjonalnych nie jest możliwe. Elektromagnesy nadprzewodnikowe w CERN-ie znajdują się także w detektorach ATLAS i CMS. Nadprzewodniki w CERN-ie wykorzystywane są także do budowy nadprzewodnikowych przepustów prądowych do zasilania nadprzewodnikowych elektromagnesów akceleratora i detektorów. Miejsca zastosowania nadprzewodników w CERN-ie przedstawia diagram na rys. 4.2.2.

Do budowy wszystkich elektromagnesów nadprzewodnikowych w CERN-ie zużyto 1200 ton nadprzewodnika niskotemperaturowego NbTi, w formie kabla nadprzewodnikowego Rutherforda, o łącznej długości 7600 km. Wykonawcami kabla były dwie firmy: Furukawa Electric z Japonii i Outokumpu z Finlandii. Do wyprodukowania całego potrzebnego nadprzewodnika zużyto dwuletnią światową produkcję niobu.



Rys.4.2.2 Zastosowanie nadprzewodników w CERN-ie

Do produkcji uzwojeń solenoidów i toroidów nadprzewodnikowych dla detektorów ATLAS i CMS użyto, ze względów mechanicznych, kabla Rutherforda w stabilizatorze aluminiowym, o wymiarach 72 x 22,3 mm.

Parametry nadprzewodnika NbTi użytego w CERN-ie oraz kabla Rutherforda zamieszczono w tabelicy 4.2.1.

Tabela 4.2.1. Parametry nadprzewodnika NbTi i kabla Rutherforda

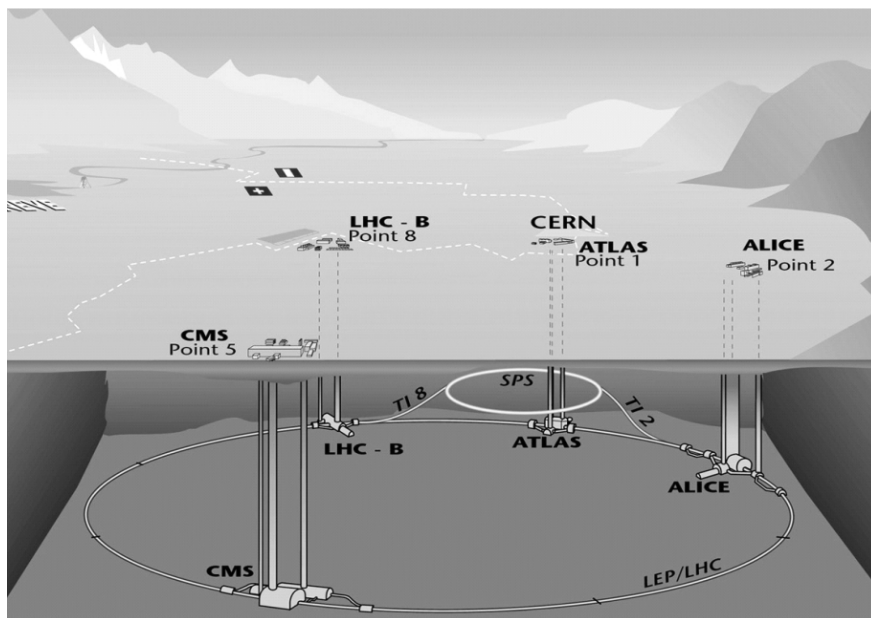
| Miejsce zastosowania                                   | Wewnętrzne warstwy       | Zewnętrzne warstwy       |
|--------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Żyły                                                   |                          |                          |
| Średnica żyły                                          | 1,065 mm                 | 0,825 mm                 |
| Stosunek miedzi do nadprzewodnika                      | 1,6 – 1,7 ( $\pm 0,03$ ) | 1,9 – 2,0 ( $\pm 0,03$ ) |
| Średnica włókna NbTi                                   | 7 $\mu\text{m}$          | 6 $\mu\text{m}$          |
| Liczba włókien w żyły                                  | 8900                     | 6500                     |
| Prąd krytyczny żyły $I_c$ 10 T @ 1,9 K<br>9 T @ 1,9 K  | $\geq 515$ A             | $\geq 380$ A             |
| Kable Rutherforda                                      |                          |                          |
| Liczba żył w kablu                                     | 28                       | 36                       |
| Wymiary kabla: grubość<br>szerokość                    | 2,064 mm<br>15,1 mm      | 1,598 mm<br>15,1 mm      |
| Poskok przepływu                                       | 115 mm                   | 100 mm                   |
| Prąd krytyczny kabla $I_c$ 10 T @ 1,9 K<br>9 T @ 1,9 K | $\geq 13750$ A           | $\geq 12960$ A           |
| Rezystancja kontaktu $R_c$                             | $\geq 20$                | $\geq 40$                |

### 4.2.3. LHC – Large Hadron Collider

Zasada działania akceleratorów cząstek polega na wykorzystaniu wpływu pól elektrycznego i magnetycznego na ruch naładowanych cząstek. Pole elektryczne przekazuje swą energię cząstkom, przyspieszając je w ten sposób, podczas gdy pole magnetyczne zakrzywia je i ogniskuje, tworząc wiązki. Istnieją różne typy akceleratorów. W akceleratorach liniowych cząstki prowadzone są po torach prostoliniowych poprzez kolejne obszary pola elektrycznego i zwiększają one swą energię przy przemieszczaniu się wzdłuż akceleratora. W akceleratorach kołowych (cyklotrony i synchrotrony) cząstki kierowane są przez pole magnetyczne po torach kołowych, tak że wielokrotnie przechodzą przez to samo przyspieszające pole elektryczne.

W 1994 roku rada CERN-u zatwierdziła budowę akceleratora o nazwie Large Hadron Collider czyli Wielki Zderzacz Hadronowy. Akcelerator cząstek w CERN jest połączeniem skomplikowanych maszyn, które stopniowo zwiększają energię przyspieszanych cząstek. Każda z maszyn wprowadza wiązkę do następnej. W ostatnim elemencie tego akceleratora wiązki są przyspieszone do energii 7 TeV. Energia zależy od promienia maszyny oraz pola magnetycznego wytwarzanego przez dipole, które utrzymują cząsteczki na ich orbicie. LHC zbudowany jest 100 m pod ziemią w tunelu o obwodzie 27 km.

Obecnie wszystkie prace związane z budową akceleratora są już zakończone. Trwa natomiast proces jego uruchamiania. LHC jest największym na świecie akceleratorem kołowym zbudowanym całkowicie w oparciu o elektromagnesy nadprzewodnikowe.



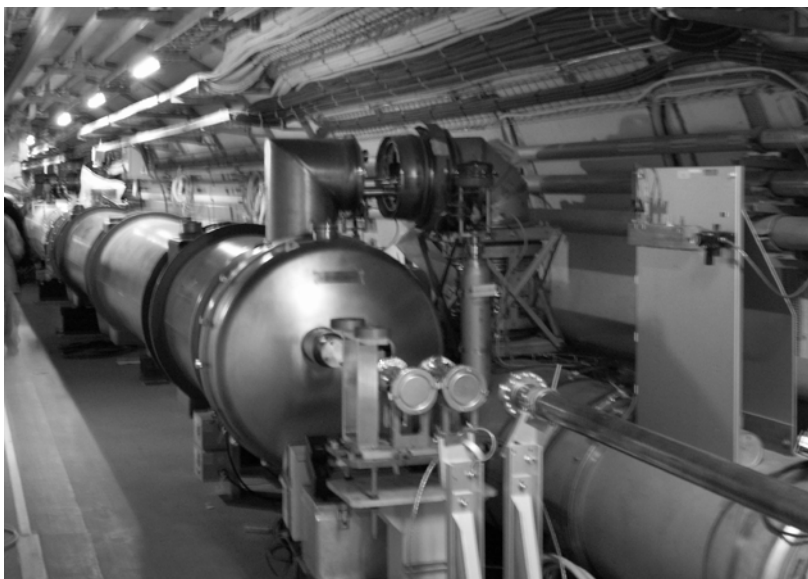
Rys.4.2.3. Schemat akceleratora LHC – rozmieszczenie eksperymentów

Akcelerator LHC powstał w istniejącym tunelu po zdemontowanym akceleratorze LEP. Średnia głębokość tunelu akceleratora wynosi 100 m. Schemat akceleratora z umieszczonymi na jego obwodzie detektorami przedstawiony jest na rys.4.2.3, natomiast jego parametry techniczne zamieszczono w tablicy 4.2.2.

Tablica 4.2.2. Główne parametry akceleratora LHC

|                                               |                      |
|-----------------------------------------------|----------------------|
| Obwód                                         | 26 659 m             |
| Temperatura pracy elektromagnesów             | 1,9 K                |
| Liczba elektromagnesów                        | 9300                 |
| Liczba dipoli                                 | 1232                 |
| Liczba kwadrupoli                             | 858                  |
| Liczba elektromagnesów korekcyjnych           | 6400                 |
| Liczba komór kawitacyjnych                    | 8 na wiązkę          |
| Znamionowa energia wiązki protonowej          | 7 TeV                |
| Indukcja robocza głównych dipoli i kwadrupoli | 8,3 T                |
| Liczba pakietów w wiązce protonowej           | 2808                 |
| Liczba protonów w wiązce                      | $1,1 \times 10^{11}$ |
| Liczba cykli na sekundę                       | 11 245               |
| Liczba zderzeń na sekundę                     | 600 mln              |
| Zużycie energii na cykl                       | 120 MW               |

Fotografia przedstawia widok z wnętrza tunelu akceleratora z zainstalowanymi elektromagnesami nadprzewodnikowymi.



Rys.4.2.4. Tunel akceleratora LHC

#### 4.2.4. Elektromagnesy dla LHC

W LHC źródłem pola magnetycznego o indukcji 8,33 T przy prądzie znamionowym o natężeniu 11,850 kA są dipole nadprzewodnikowe. Uzwojenia elektromagnesów nadprzewodnikowych zbudowane z kablem Rutherford (NbTi) chłodzone są nadciekłym helem o bardzo dobrej przewodności cieplnej i pracują w temperaturze 1,9 K. W LHC zastosowano 9300 różnych elektromagnesów takich jak dipole, quadropole, sextupole, octupole, decapole itd.

Każdy z tych elektromagnesów bierze udział w optymalizowaniu trajektorii wiązki. Większość elektromagnesów korekcyjnych jest wbudowanych w „zimną masę” dipoli lub quadropoli. Większość elektromagnesów ma dwie apertury, jedną aperturę mają quadropole specjalne służące do ogniskowania wiązki do jak najmniejszych rozmiarów przed punktem kolizji wielokrotnie zwiększając przez to szansę zderzenia czołowego protonów.

Elektromagnesy w akceleratorze LHC dzielą się na główne i korekcyjne. Elektromagnesy główne, dipole i kwadropole, służą do zakrzywiania i ogniskowania wiązki. Elektromagnesy korekcyjne, dipole kwadropole, sextupole i oktupole, mają za zadanie zapewnienie odpowiedniej optyki wiązki. Zestawienie elektromagnesów akceleratora przedstawiono w tablicy 4.2.3.

Główne dipole, o długości 15 m i masie 35 t, służą do zginania wiązki na łukach akceleratora. Elektromagnesy wyprodukowane zostały przez Alstom – Francja, Ansaldo – Włochy i Noell – Niemcy. Główne kwadropole (tzw. Short Strait Section – Krótkie Proste Odcinki), o długości 7,5 m i masie 8 t, służą do ogniskowania wiązki na prostych odcinkach akceleratora.

Tablica.4.2.3. Główne i korekcyjne elektromagnesy LHC

| Typ  | Liczba | Nazwa i funkcja elektromagnesu                                   | Indukcja magnetyczna $B$ , T | Prąd $I$ , A |
|------|--------|------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------|
| MB   | 1232   | Główne dipole                                                    | 8,33                         | 11 850       |
| MQ   | 400    | Główne kwadropole                                                | 8,33                         | 11 850       |
| MSCB | 376    | Elektromagnesy korekcyjne dipol – sextupol:<br>dipol<br>sextupol | 1,28<br>2,9                  | 550<br>550   |
| MQT  | 256    | Kwadropole korekcyjne                                            | 125 T/m                      | 550          |
| MQTL | 36     | Długie kwadropole korekcyjne                                     | 125 T/m                      | 550          |
| MCBC | 266    | Dipole korekcyjne                                                | 3,11                         | 550          |
| MCS  | 2464   | Sextupole korekcyjne                                             | 1970 T/m <sup>2</sup>        | 550          |
| MO   | 336    | Oktupole korekcyjne                                              | 2,8                          | 550          |



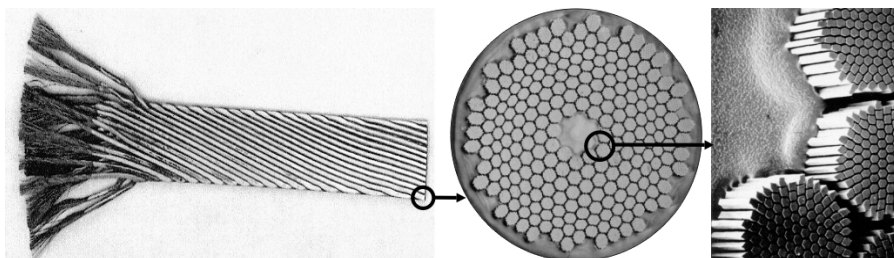
Głównym producentem kwadрупoli był Accel z Niemiec. Elektromagnesy korekcyjne, zapewniające odpowiednią optykę wiązki, umieszczone są razem z elektromagnesami głównymi we wspólnych kriosatach, tworząc zespoły elektromagnesów nadprzewodnikowych. Główne dipole i kwadрупole oraz elektromagnesy korekcyjne przedstawia rys.4.2.5.



Rys.4.2.5. Elektromagnesy nadprzewodnikowe w akceleratorze LHC: a) główne kwadрупole, b) główne dipole w koldmasie, c) korektor MSC

#### 4.2.5. Budowa uzwojeń nadprzewodnikowych dla dipoli

Uzwojenia nadprzewodnikowe wykonane są z kabla Rutherforda NbTi o grubości 2,064 mm dla wewnętrznego i 1,598 mm dla zewnętrznego uzwojenia, szerokość kabla dla obu uzwojeń wynosi 15,1 mm.



Rys. 4.2.6. Kabel nadprzewodnikowy Rutherford (NbTi)

Kabel uzwojenia wewnętrznego ma 28 żył, o średnicy 1,065 mm w każdej znajduje się 8900 włókien NbTi o średnicy 7 mikrometrów. Kabel uzwojenia zewnętrznego ma 36 żył o średnicy 0,825 mm. Liczba włókien nadprzewodnika to 6500 o średnicy 6 mikrometrów.

Tablica 4.2.4. Wybrane parametry dipola LHC

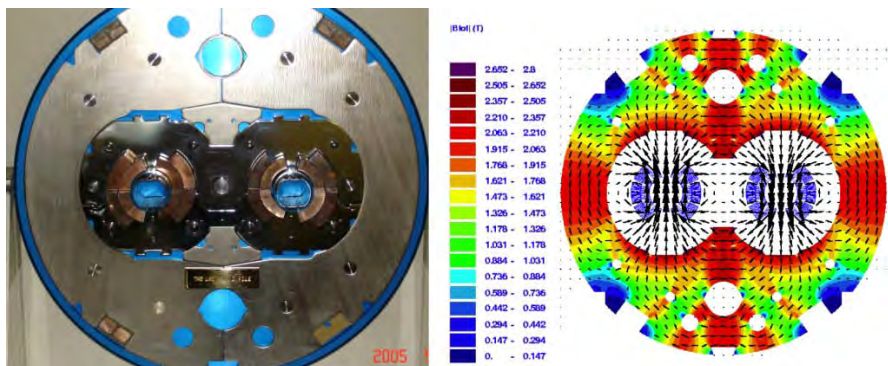
| Parametry dipola                               |                   |
|------------------------------------------------|-------------------|
| Prąd znamionowy (max.)                         | 11850A (12850 A)  |
| Indukcja magnetyczna znamionowa (max.)         | 8,33T (9T)        |
| Energia zmagazynowana w polu magnetycznym      | 6,93 MJ (8,11 MJ) |
| Temperatura pracy                              | 1.9 K             |
| Składowa pozioma siły działającej na uzwojenie | 1.8 MN (2,1 MN)   |
| Składowa pionowa siły działającej na uzwojenie | 0,81 MN (0,94 MN) |
| Siła osiowa działająca na końce uzwojeń        | 0,4 MN            |
| Długość „zimnej masy” (cały dipol)             | 15,18 m (16,5 m)  |
| Średnica „zimnej masy”                         | 570 mm            |
| Masa                                           | 27,5 t            |



Rys. 4.2.7. Uzwojenia dipola wykonane w firmie Ansaldo Superconductor

Uzwojenie po nawinięciu jest wygrzewane w temperaturze 190 C p rzez 3 godziny w celu sklejenia zwojów (zewnątrzna izolacja posiada cienka warstwę żywicy) i uzyskania wymaganych wymiarów uzwojenia w tolerancji  $\pm 0,05\text{mm}$ .

Do poprawnego działania LHC wymagana jest wysoka jakość pola magnetycznego wytwarzanego przez dipole, dlatego powinny mieć one identyczne charakterystyki.

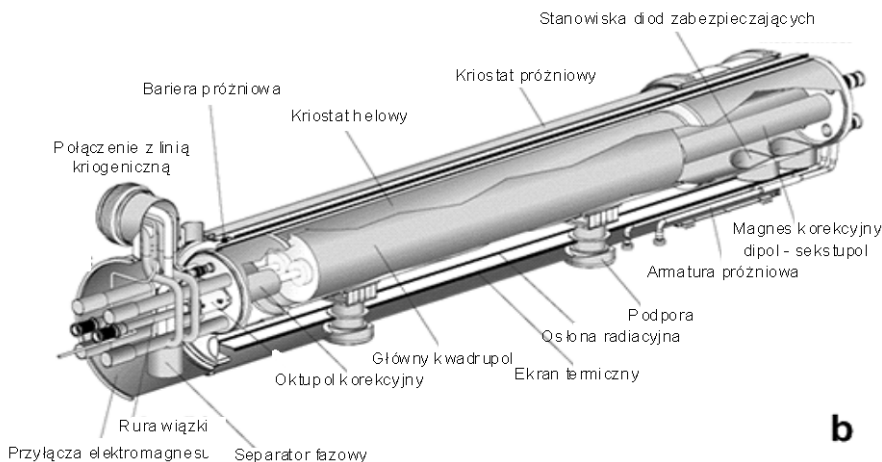
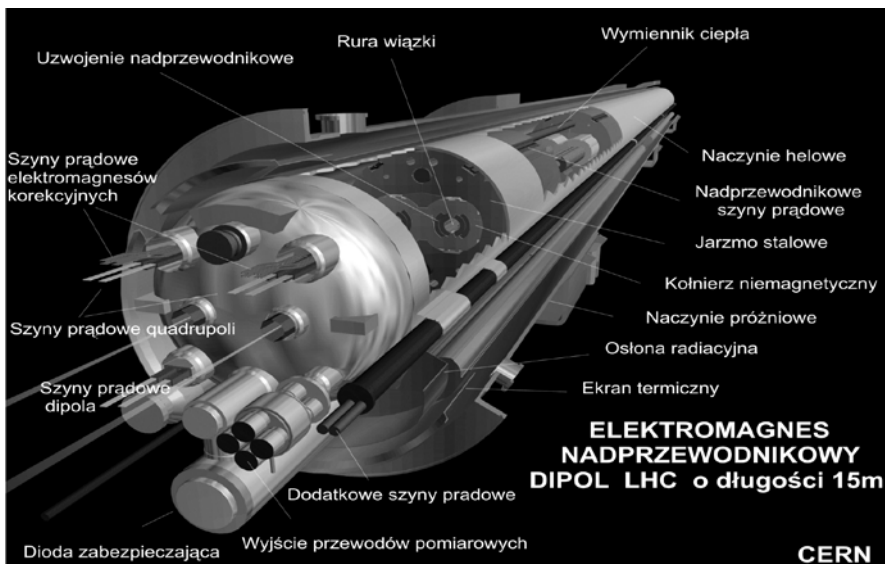


Rys. 4.2.8. Przekrój dipola oraz rozkład indukcji magnetycznej w jarzmie stalowym

Konstrukcja mechaniczna dipola jest odpowiednio zaprojektowana, aby wytrzymać duże siły wytwarzane przez elektromagnes i ograniczyć deformację uzwojenia. Zimna masa dipola jest składana w temperaturze pokojowej, pracować będzie w temperaturze 1,9K. Ze względu na użyte różne materiały o różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej całość jest składana w prasie ze wstępnym naprężeniem. Kołnierze wykonane z 3mm stali austenitycznej ściskają uzwojenie wytwarzając naprężenia 70 MPa i 7 5 MPa dla wewnętrznego i zewnętrznego uzwojenia. Jarzmo wykonane jest z blach ze stali niskowęglowej o grubości 6 mm. Całość po zmontowaniu umieszczana jest w prasie i dwa ściskające półcylindry stalowe są spawane wzdłuż.



Rys. 4.2.9. Połączenia uzwojeń dipola przed przyspawaniem pokrywy

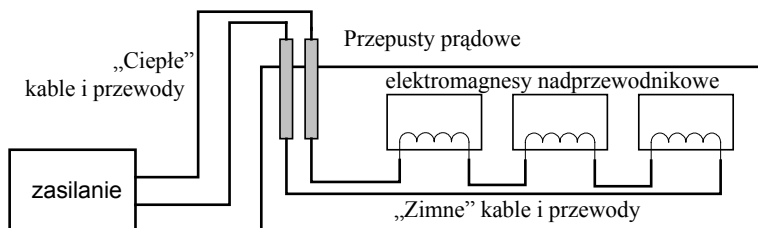


Rys.4.2.10. Główne elektromagnesy LHC w kriostatach: a) dipole, b) kwadropole

#### 4.2.6. Zasilanie elektromagnesów nadprzewodnikowych LHC – przepusty prądowe

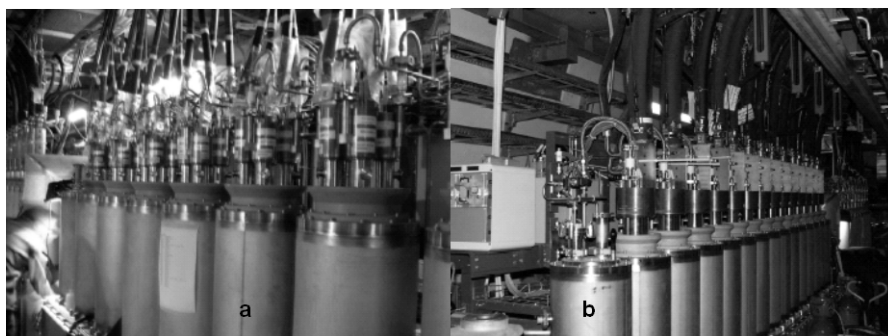
Zasilanie elektromagnesów nadprzewodnikowych wymaga stosowania technologii ograniczającej przedostawanie się ciepła z otoczenia elektromagnesu do jego środka, znajdującego się w temperaturze kriogenicznej. Aby wyeliminować straty Joule'a, powstające w przewodzie podczas przepływu prądu, stosuje się nadprzewodnikowe przepusty prądowe oraz „zimne” kable i przewody pracujące w

temperaturach kriogenicznych. Schemat układu zasilania sekcji elektromagnesów nadprzewodnikowych, tzw. DBF – Cryogenic Electrical Feed Box (kriogeniczny terminal zasilający) przedstawiony jest poniżej. Układ taki składa się z zasilacza, zasilającego jedną sekcję elektromagnesów, oraz zespołu przepustów prądowych i „zimnych kabli”.



Rys. 4.2.11. Schemat kriogenicznego terminala zasilającego DBF

Poniższy rysunek przedstawia DBF-y z zespołem przepustów 13 kA i 600 A.



Rys.4.2.12. DBF – przepusty prądowe: a) 600 A , b) 13 000 A

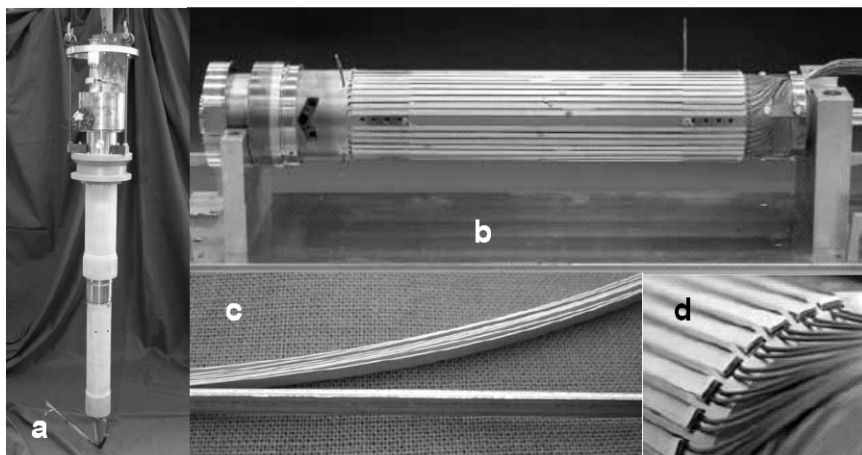
W skład systemu zasilania elektromagnesów akceleratora LH C wchodzi 3286 przepustów prądowych, w tym 1823 nadprzewodnikowe, tablica 4.2.5.

Tablica.4.2.5. Przepusty prądowe w akceleratorze LHC

| Liczba przepustów w akceleratorze LHC – 3286 w tym |              |     |
|----------------------------------------------------|--------------|-----|
| 64                                                 | 13 000 A     | HTS |
| 298                                                | 6 000 A      | HTS |
| 820                                                | 600 A        | HTS |
| 2104                                               | 60 A – 120 A | Cu  |

Nadprzewodnikowe przepusty prądowe, składają się z części nadprzewodzącej, wykonanej z nadprzewodnika HTS, oraz elementów miedzianych. Temperatura pracy elementów HTS wynosi 4,5 K, natomiast elementy miedziane pracują w temperaturze 20 K. Elementy nadprzewodnikowe przepustów

wykonane są łącznie z 31 km taśmy HTS BSCCO 2223 w matrycy Ag/5%Au, produkcji American Superconductors (ASC), oraz European Advanced Superconductors (EAS), o prądach krytycznych 120 A (ASC) i 70 A (EAS). Fotografia przedstawia widok nadprzewodnikowego przepustu prądowego 13 kA, oraz szczegóły konstrukcyjne elementu nadprzewodnikowego, wykonane z taśmy HTS.



Rys.4.2.13. Przepust prądowy 13 kA: a) przepust nadprzewodnikowy, b), c), d) budowa elementu nadprzewodnikowego

#### 4.2.7. Chłodzenia elektromagnesów nadprzewodnikowych LHC

Aby możliwa była praca urządzeń nadprzewodnikowych muszą one pracować w temperaturze niższej od temperatury krytycznej zastosowanego nadprzewodnika. W wszystkich elektromagnesach nadprzewodnikowych w akceleratorze LHC oraz w detektorach chłodzone są nadciekłym heliem, o temperaturze 1,9 K oraz ciekłym azotem, o temperaturze 77 K. Do dystrybucji helu służy specjalna Kriogeniczna Linia Dystrybucyjna, tzw. QRL, biegnąca równolegle z elektromagnesami nadprzewodnikowymi w tunelu akceleratora. QRL rozprowadza oprócz helu także ciekły azot, stosowany do chłodzenia wstępnego. Poniższa fotografia przedstawia QRL bez elektromagnesów nadprzewodnikowych z terminalem przyłączeniowym na pierwszym planie.

W tablicy 4.2.6 przedstawiono zapotrzebowanie na hel i azot elektromagnesów akceleratora LHC.

Tablica 4.2.6. Zapotrzebowanie na ciekły hel i azot akceleratora LHC

|                                                                  |          |
|------------------------------------------------------------------|----------|
| Chłodzenie wstępne do 80 K – ciekły azot                         | 10 050 t |
| Chłodzenie do temperatury 4,2 K – ciekły hel                     | 60 t     |
| Roczne zużycie helu na utrzymanie temperatury pracy akceleratora | 96 t     |



Rys. 4.2.14. Widok Kriogenicznej Linii Dystrybucyjnej – QRL

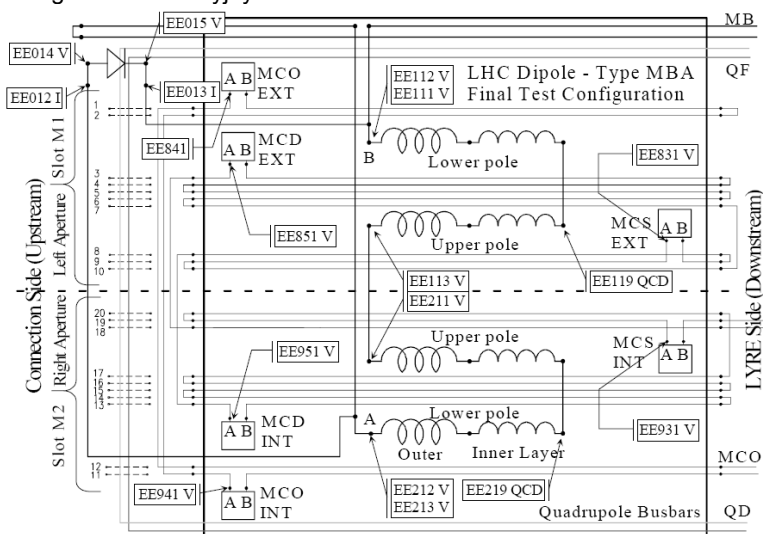
Rysunek 4.2.15 przedstawia skraplarkę helową (1 z 8) o wydajności 41 g LHe/s i mocy 1,8 kW w temperaturze 4,5 K, wytwarzającą ciekły hel dla LHC



Rys.4.2.14. Skraplarka helowa 1,8 kW @ 4,5 K, o wydajności 41 gLH/s

#### 4.2.8. Testy elektromagnesów dla LHC

Wszystkie główne elektromagnesy przed zainstalowaniem w tunelu zostały przetestowane w hali testów. W hali SM18 znajduje się 12 stanowisk testowych (6 par) każda para posiada zasilacz 13 kA i 600A oraz elektronikę zabezpieczającą i sterującą, a także system rejestracji danych. Główne elektromagnesy nadprzewodnikowe dipole i quadropole, testowane „na zimno” w 1,9 K w hali testów SM18 były wcześniej specjalnie do tego przygotowane. W tunelu elektromagnesy łączone są mechanicznie jak i elektrycznie z obu stron z zeregowo natomiast zasilanie jak i chłodzenie na stanowisku testowym jest tylko z jednej strony, dlatego z drugiej strony zakładany był mostek dla ciekłego helu oraz mostek z kabla nadprzewodnikowego. Dodatkowo zgodnie ze schematem łączone były spoolpiece busbar – przewody nadprzewodnikowe 600A służące do zasilania elektromagnesów korekcyjnych.



Rys.4.2.16. Schemat elektryczny połączeń dipola do testu w SM18

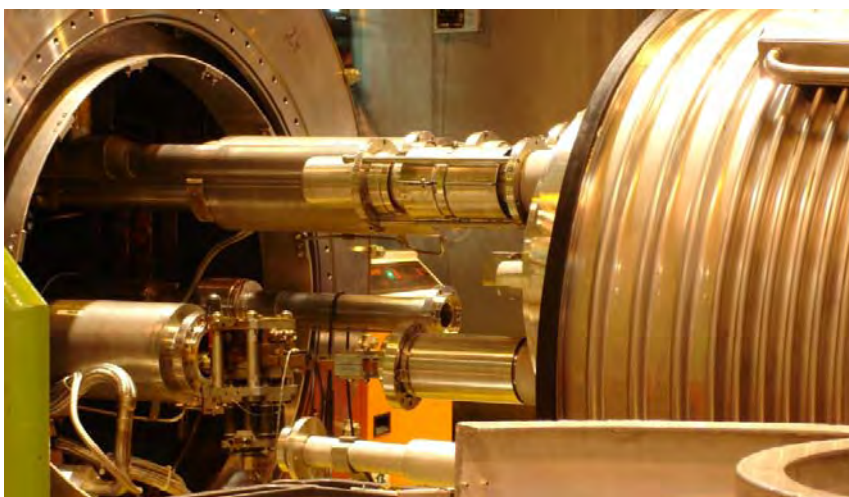
Na stanowisku testowym przetestowanymi mocami wykonywane są pomiary ciągłości wszystkich obwodów w elektromagnesie (przewody pomiarowe, czujnik temperatury, elektromagnesy korekcyjne, quench heater, itd.). Test ciągłości umożliwia wykrycie uszkodzonych przewodów pomiarowych, pomyłek w montażu oraz uszkodzeń w obwodzie zabezpieczającym uzwojenia nadprzewodnikowe. Test izolacji wykonywany jest dla napięć 0,6kV, 1,8kV, 3kV przed schłodzeniem i po osiągnięciu 1,9K. Powyższe testy są powtarzane również po testach mocy.

Podłączenie dipola do stanowiska testowego trwa około 12 godzin, następnie 12 godzin zajmuje odpompowanie i osiągnięcie próżni w elektromagnesie i stanowisku testowym, dalsze 12 godzin, aby osiągnąć 90 K w elektromagnesie poprzez cyrkulację gazowego helu o temperaturze 80 K i kolejne kilkanaście godzin do osiągnięcia 4,5 K, aby następnie wypełnić ciekłym heliem i wtedy schładzać dalej do 1,9 K.





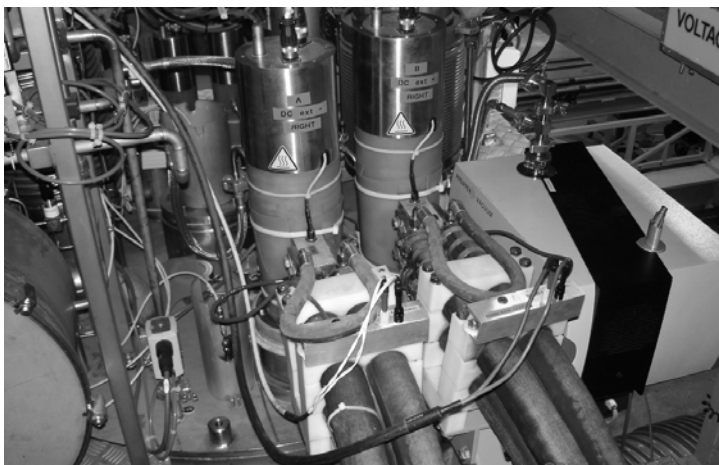
Rys.4.2.17 .Hala testów SM18 w CERN



Rys.4.2.18. Stanowisko testowe dipola w SM18 - podłączenie elektromagnesu

Wykonanie testów na zimno trwa około 26 godzin ( kilka go dzin j est potrzebnych, aby elektromagnes powrócił po quenchu do temperatury 1.9 K). Poprzez cyrkulację gazowego helu o temperaturze 320 K w 12 godzin elektromagnes powraca z 10 K do temperatury pokojowej i następuje odłączenie od stanowiska testowego.

Po pierwszym schłodzeniu wykonuje się do 9 prób osiągnięcia prądu „ultimate”  $I_0=12850$  A (9T). Elektromagnes uważany jest za „wytrenowany”, jeżeli: przy drugim quenchu  $I_q > 12000$  A (8,4 T), lub przy trzecim quenchu  $I_q > 12250$  A (8,6 T), lub prąd osiągnie wartość 12850 A (9 T).



Rys.4.2.19. Przepusty prądowe 13kA (stanowisko testowe dipola w SM18)

Jeżeli warunki te nie są spełnione to elektromagnes jest ogrzewany i schładzany ponownie jest to „Cykl termiczny” i wykonywane są tylko 2 quenche. Jeżeli  $I_q(1) > I_q(1)$  przed cyklem termicznym, oraz  $I_q(2) > 12000\text{ A}$  (8,4T), wtedy elektromagnes jest zaakceptowany. Jeżeli nadal powyższe warunki nie są spełnione to drugi cykl termiczny wykonuje się z antykriostatami i quench anteną. Antykriostaty umożliwiają włożenie sond pomiarowych pola magnetycznego do rur wiązki i utrzymanie ich w temperaturze pokojowej i ciśnieniu atmosferycznym, podczas gdy same rury wiązki znajdują się w próżni i temperaturze 1.9 K.

#### 4.2.9. Instalacja elektromagnesów w tunelu

Po testach w hali SM18 elektromagnesy przewożone są do SM12, gdzie przechodzą ostateczne przygotowania przed transportem do tunelu.



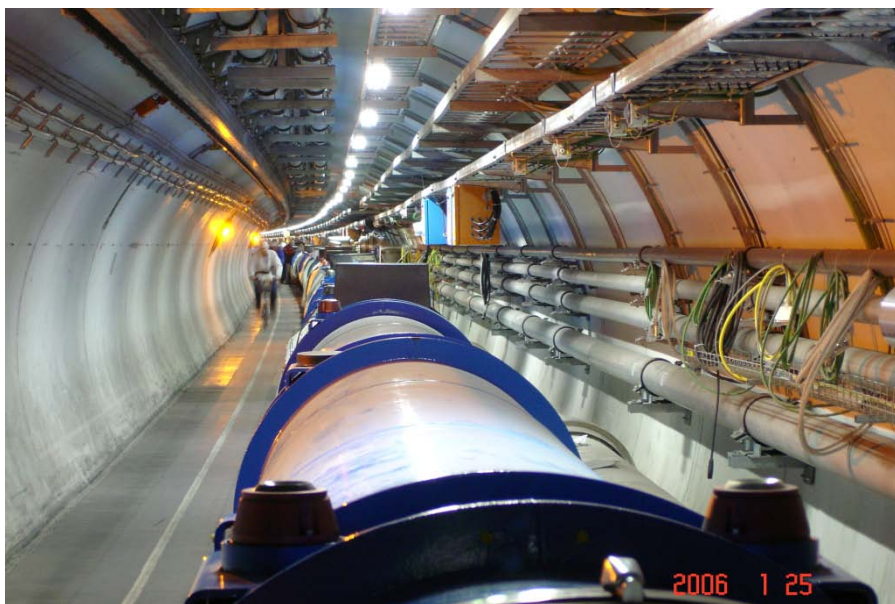
Rys.4.2.20. Transport dipola do tunelu w hali SM12

W tunelu elektromagnesy łączone są szeregowo. Główne szyny prądowe są lutowane, natomiast szyny prądowe elektromagnesów korekcyjnych 600A łączone są za pomocą ultradźwięków.



Rys.4.2.21. Połączenie szyn prądowych głównych elektromagnesów oraz elektromagnesów korekcyjnych w tunelu

Wzdłuż elektromagnesów nadprzewodnikowych w tunelu biegnie linia kriogeniczna QRL, która co 106,9 m przez łącznik dostarcza czynnik chłodzący do elektromagnesów.



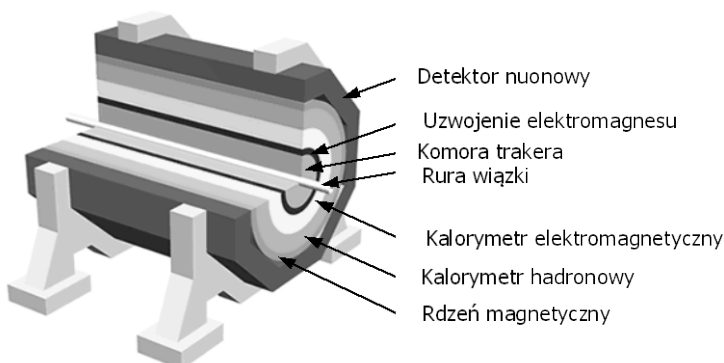
Rys. 4.2.22. Widok elektromagnesów zainstalowanych w tunelu

W LHC zastosowano 123 dipole i 392 quadrupole, oraz ponad sto specjalnych quadrupoli i elektromagnesów dopasowujących wiązkę przed każdym eksperymentem.

#### 4.2.10. Detekcja cząstek elementarnych –detektory i akceleratory w CERN-ie

Detekcja cząstek elementarnych dokonywana jest w urządzeniach zwanych detektorami. Obecnie eksperymenty fizyki cząstek wykorzystują wiele różnorodnych detektorów, z których każdy ma określone zadania mające na celu pomiar i identyfikację cząstek. W przypadku CERN-u są to cztery detektory (ATLAS, ALICE, CMS i LHCb). Rysunek 4.2.23 przedstawia schemat budowy typowego detektora zderzeniowego.

Identyfikacja danej cząstki elementarnej, powstałej w wyniku wysokoenergetycznego zderzenia strumieni materii w przestrzeni roboczej detektora, następuje na podstawie analizy toru po jakim porusza się ona w polu magnetycznym, wytworzonym przez elektromagnes detektora, pomiarów pędu, energii a czasem i prędkości cząstki. Do pomiaru energii cząstek wykorzystywane są detektory zwane kalorymetrami. Są one tak skonstruowane, żeby wyhamować większość z neutralnych i naładowanych cząstek. Zazwyczaj do pomiaru energii elektronów i fotonów potrzebny jest inny typ kalorymetru niż do pomiaru energii protonów, neutronów, pionów i pozostałych hadronów, czyli cząstek zbudowanych z kwarków.

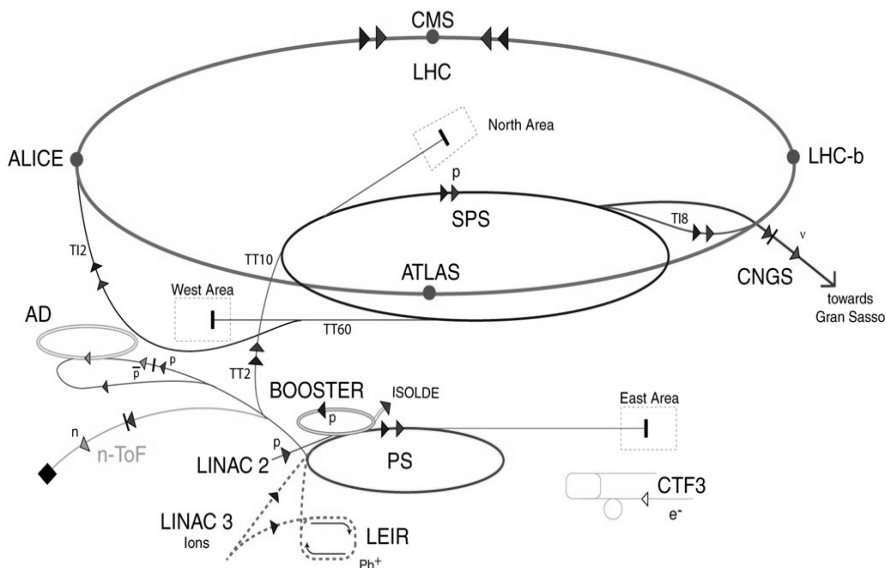


Rys.4.2.23.Budowa detektora cząstek elementarnych

Aby możliwe było uzyskanie wysokoenergetycznego zderzenia strumieni cząstek, strumienie te, zwane wiązkami protonowymi, muszą mieć dużą energię oraz poruszać się z dużą prędkością, bliską prędkości światła. Przyspieszanie wiązek następuje w urządzeniach zwanych akceleratorami.

W CERN-ie znajdują się zarówno akceleratory liniowe, służące do wstępnego przyspieszania cząstek, jak i główne akceleratory kołowe, w których wiązki uzyskują ostateczną energię i prędkość. Do tych ostatnich należą akceleratory PS i SPS oraz największy na świecie akcelerator kołowy LHC – Large Hadron Collider, o obwodzie 27 km. Strukturę akceleratorów w CERN-ie przedstawia rysunek 4.2.24.

Na obwodzie akceleratora LHC umieszczone są główne eksperymenty CERN-u, z detektorami ATLAS, ALICE, CMS oraz LHCb.

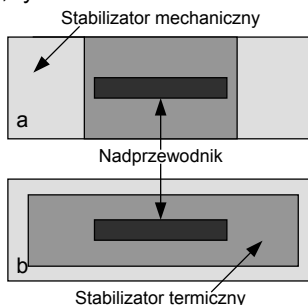


**AD** -Antyproton Decelerator, **PS** – Proton Synchrotron, **SPS** – Super Proton Synchrotron, **LHC** – Large Hadron Collider, **ALICE** - A Large Ion Collider Experiment, **CMS** – Compact Muon Selenoid, **LHCb** – Large Hadron Collider beauty Experiment, **ATLAS** – Nuon Particles Detector

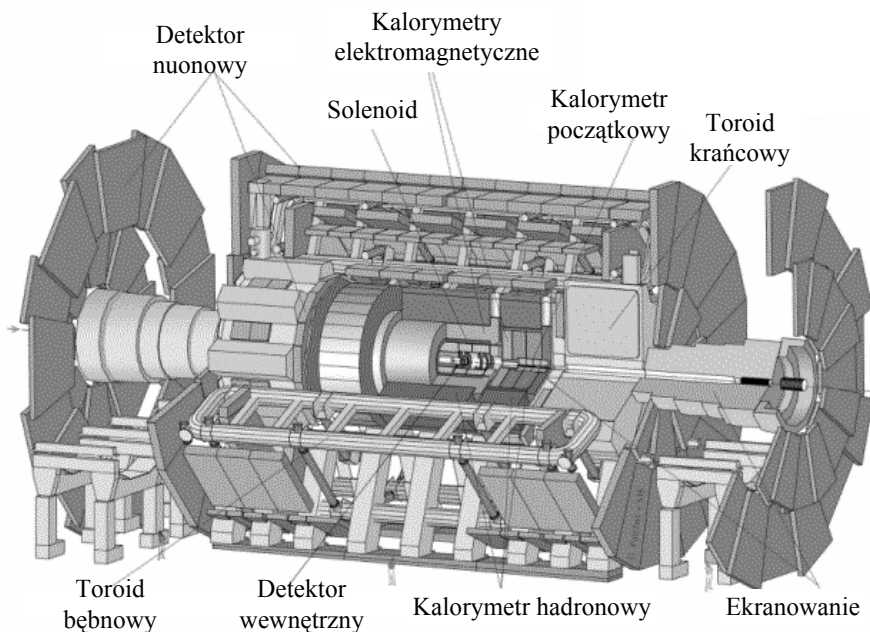
Rys.4.2.24.Akceleratory w CERN-ie

#### 4.2.11. Elektromagnesy nadprzewodnikowe dla ATLAS-a i CMS-a

Elektromagnesy nadprzewodnikowe są głównym źródłem pola magnetycznego w detektorach ATLAS i CMS. Do produkcji uzwojeń solenoidów i toroidów nadprzewodnikowych dla CMS-a i ATLAS-a użyto nadprzewodnikowego (NbTi) kabla Rutherford'a, w termicznym i mechanicznym stabilizatorze alumiiniowym, o wymiarach 72 mm x 22,3 mm, rysunek.

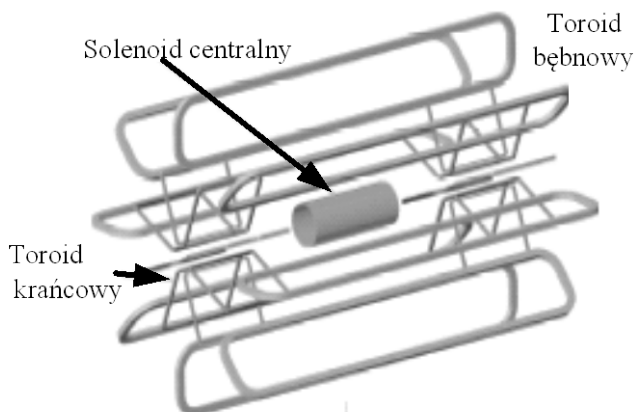


Rys.4.2.25.Kabel Rutherford'a w stabilizatorze alumiiniowym: dla CMS-a a), dla ATLAS-a b)



Rys.4.2.26. Schemat detektora ATLAS

Detektor ATLAS – Toroidal LHC Apparatus, o długości 44 m, średnicy 22 m i masie 7000 t, służący do detekcji ciężkich cząstek, jest największym detektorem w CERN-ie. Posiada on aż trzy elektromagnesy nadprzewodnikowe: centralny solenoid, będący głównym źródłem pola magnetycznego, oraz dwa elektromagnesy toroidalne.

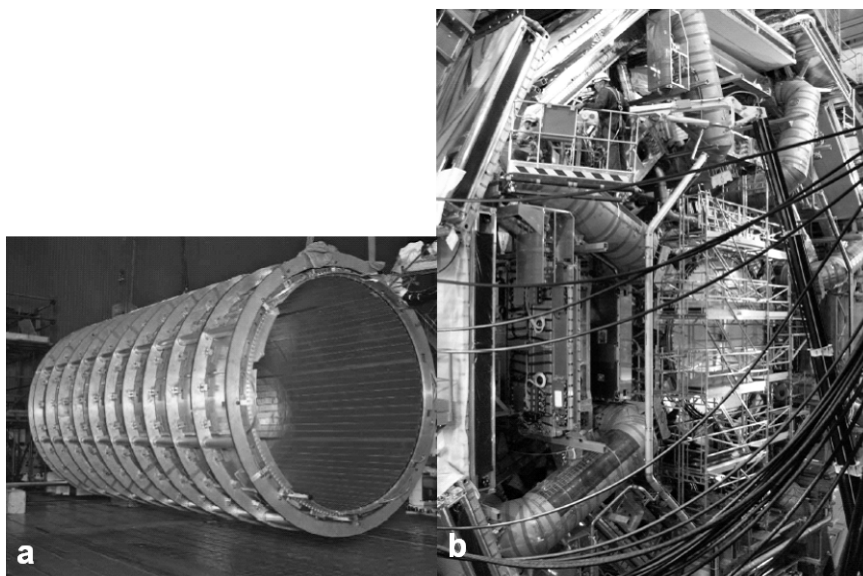


Rys.5.27. Elektromagnesy nadprzewodnikowe w ATLAS-ie

Parametry techniczno - eksploatacyjne w/w elektromagnesów przedstawia tabela 4.2.7.

Tablica.4.2.7. Parametry elektromagnesów nadprzewodnikowych detektora ATLAS

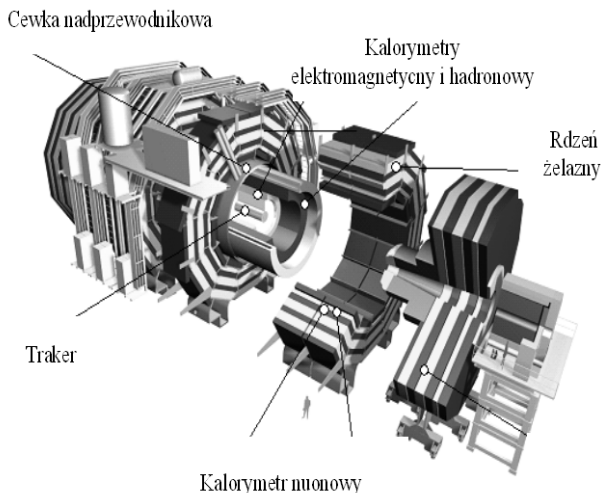
| Toroidy                         | Bębnowy               | Krańcowe       |
|---------------------------------|-----------------------|----------------|
| Długość / średnica zewnętrzna   | 25,3 m / 20,1 m       | 5,0 m / 10,7 m |
| Masa                            | 830 t                 | 240 t          |
| Liczba cewek                    | 8                     | 8              |
| 1,08                            | 1,08 GJ               | 0,25 GJ        |
| Pole magnetyczne wewnątrz cewki | 4 T                   | 4 T            |
| Przewód Al/NbTi/Cu              | 56 km                 | 13 km          |
| Prąd znamionowy                 | 20,5 kA               | 20,5 kA        |
| Druć nadprzewodnikowy NbTi      | 100 km                | –              |
| Centralny solenoid              |                       |                |
| Długość / średnica / grubość    | 5,3 m / 2,4 m / 4,5 m |                |
| Masa                            | 5 t                   |                |
| Pole magnetyczne wewnątrz cewki | 2 T                   |                |
| Energia zmagazynowana           | 38 MJ                 |                |
| Przewód NbTi                    | 9 km                  |                |
| Prąd znamionowy                 | 7,73 kA               |                |



Rys.4.2.28 Elektromagnesy nadprzewodnikowe w ATLAS-ie: a) solenoid centralny, b) toroid bębnowy



Detektor CMS – Compact Nuon Solenoid, służący do detekcji lekkich cząstek słabo oddziałujących z otoczeniem, zwanych mionami, o długości 21,6 m, średnicy 15 m i masie 12 500 t, jest z kolei najcięższym detektorem w CERN-ie. Jego solenoid centralny o długości 12,5 m oraz średnicy 6 m, jest jednocześnie największym solenoidem nadprzewodnikowym na świecie. Schemat detektora przedstawia rysunek 4.2.28 natomiast w tabeli 4.2.29 zamieszczono parametry techniczno – eksploatacyjne solenoidu centralnego.

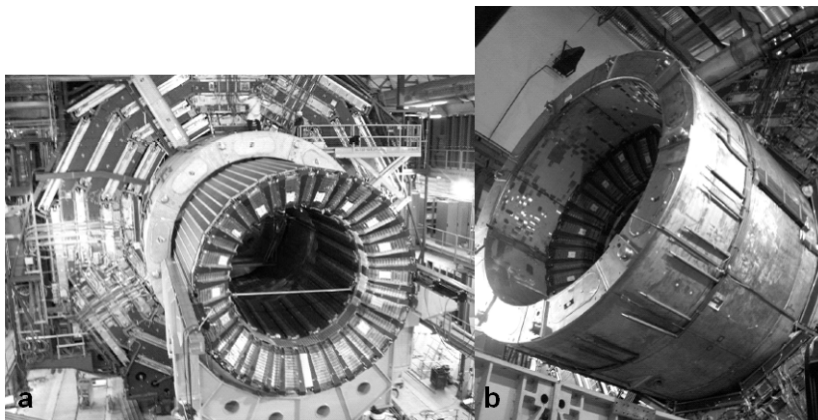


Rys. 4.2.29. Schemat detektora CMS

Tablica 4.2.8. Parametry solenoidu nadprzewodnikowego detektora CMS

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| Długość / średnica                    | 12,5 m / 6 m |
| Prąd znamionowy                       | 20,0 kA      |
| Prąd roboczy                          | 19,5 kA      |
| Prąd krytyczny w 4,2 K przy 5 T       | 62,5 kA      |
| Indukcja magnetyczna wewnątrz cewki   | 4 T          |
| Całkowita długość nadprzewodnika NbTi | 45,4 km      |
| Masa przewodów nadprzewodnikowych     | 16 t         |
| Masa czystego aluminium               | 81 t         |
| Masa stopów aluminium                 | 109 t        |
| Masa miedzi                           | 9,9 t        |
| Masa nadprzewodnika NbTi              | 6,1 t        |
| Całkowita masa solenoidu              | 222 t        |





Rys. 4.2.30. Detektor CMS: a) widok ogólny, b) solenoid centralny w kriostacie

#### 4.2.12. Eksperyment CAST

Eksperyment CAST – CERN Axion Solar Telescope, ma za zadanie poszukiwanie aksionów, hipotetycznych bardzo lekkich cząstek elementarnych emitowanych przez gwiazdy, wchodzących wg teorii kosmologicznych w skład czarnej materii wypełniającej Wszechświat. Według teorii aksiony, poruszając się w silnym polu magnetycznym, emitują fotony, których zaobserwowanie potwierdziłoby fakt ich istnienia. Ponieważ gwiazdy oraz Słońce swoim blaskiem tłumią promieniowanie emitowane przez aksiony, poruszające się w ich polu magnetycznym, powstał CAST. W skład eksperymentu wchodzi elektromagnes nadprzewodnikowy NbTi, generujący pole magnetyczne 9 T oraz zespół detektorów promieniowania w podziemnym, umieszczonych na specjalnej konstrukcji umożliwiającej śledzenie ruchu słońca. Aksiony „złapane” w polu elektromagnesu wyemitują fotony, co będzie potwierdzeniem ich istnienia. Fotografia 6 przedstawia elektromagnes nadprzewodnikowy eksperymentu CAST, na konstrukcji śledzącej, oraz zespół detektorów.



Rys.4.2.31. Widok elektromagnesu eksperymentu CAST.

#### 4.2.13. Podsumowanie

CERN jest niewątpliwie największym na świecie użytkownikiem niskotemperaturowych elektromagnesów nadprzewodników oraz wysokotemperaturowych nadprzewodnikowych przepustów prądowych

Istnieją plany jeszcze większego wykorzystania nadprzewodników, zarówno niskotemperaturowych jak i wysokotemperaturowych, w CERNi. Dotyczą one wymiany elektromagnesów konwencjonalnych akceleratorów PS i SPS na elektromagnesy nadprzewodnikowe, oraz budowy nowych elektromagnesów hybrydowych, łączących nadprzewodniki niskotemperaturowe i wysokotemperaturowe, dla akceleratora LHC.

#### 4.3. Literatura

- [1] Brechna H., "Superconducting Magnet Systems", Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, J.F.Bermann Verlag, Munchen 1973.
- [2] Brechna H.: „Superconducting Magnet Systems”, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 1973.
- [3] Gerber R., Watmough M. H.: „A Design of a Superconducting Split-Coil Open Gradient Magnetic separator”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 21, No. 5, pp. 2053-2055, September 1985.
- [4] Janowski T., Kozak S.: "Wpływ niesymetrii układu magnetycznego na wydajność nadprzewodnikowego separatora typu OGMS", XVI-SPETO 1993, str.131-138, Gliwice - Ustroń 1993r
- [5] Janowski T., Kozak S.: „The Superconducting OGMS Separator Optimization”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 29, No. 6, pp. 3261-3263, November 1993.
- [6] Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Skoczowski T., Janowski T., "The Superconducting OGMS Separator - model and calculation" JSAEM Studies in Applied Electromagnetics,4, Tokyo, Japan 1996 ss. 169-178
- [7] Wilson M. N.: „Superconducting Magnets”, Clarendon Press, Oxford 1983
- [8] [www.cern.ch](http://www.cern.ch)

## **5. PLAZMA NIETERMICZNA – WARUNKI GENERACJI, WYBRANE ZASTOSOWANIA**

### **5.1. Wstęp**

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

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

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

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

### **5.2. Właściwości i podział plazmy**

Plazma występuje w bardzo szerokim zakresie energii cząstek wynoszącym od 0,2 eV do 2 MeV. Podstawową klasyfikacją plazmy w zastosowaniach technologicznych jest podział na:

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

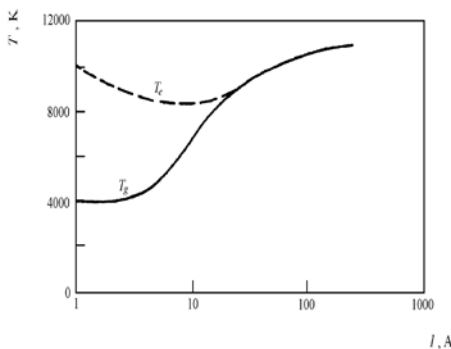
Plazma gorąca występuje w zakresie energii powyżej kilkunastu eV, jest zwykle prawie całkowicie zjonizowana, a jej źródłem w warunkach ziemskich są reakcje termojądrowe.

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

Różne własności plazmy w szerokim przedziale energetycznym skłoniły badaczy do jej klasyfikacji, ze względu na energię cząstek, na plazmę wysokotemperaturową oraz niskotemperaturową. Plazmą niskotemperaturową (nietermiczną) nazywamy zjonizowany gaz, w którym średnia energia elektronów nie przekracza energii jonizacji podstawowego komponentu ośrodka tworzącego plazmę. Oznaczając  $T_e$ ,  $T_i$  i  $T_g$  odpowiednio temperaturę elektronów, jonów i cząstek obojętnych można wyróżnić dwa skrajne przypadki:

$T_e \approx T_i \approx T_g$ , co oznacza, że średnia energia kinetyczna wszystkich cząstek plazmy jest w przybliżeniu jednakowa. Układ znajduje się w stanie zbliżonym do równowagi termodynamicznej, a plazmę określa się jako plazmę kwazirównowagową albo izotermiczną.

$T_e > T_i > T_g$ , co oznacza, że średnia energia kinetyczna elektronów i jonów oraz cząstek obojętnych jest na tyle różna, że nie można mówić o stanie równowagi termodynamicznej między cząstkami układu. Ten rodzaj plazmy niskotemperaturowej nazwano plazmą nierównowagową albo nieizotermiczną nawet wtedy, gdy lokalnie równowaga może występować, albo w odniesieniu do wszystkich cząstek, albo do cząstek określonego rodzaju.



Rys. 5.1. Wykres zależności temperatury elektronów ( $T_e$ ) i obojętnych cząstek gazu ( $T_g$ ) od natężenia prądu ( $I$ ) [1]

Nierównowagowa plazma niskotemperaturowa powstaje głównie w wyładowaniach elektrycznych różnego rodzaju i różni się od równowagowej tym, że cząstki naładowane, wchodzące w skład plazmy znajdują się w stałe przyspieszającym je polu elektrycznym, utrzymującym na stałym poziomie energię kinetyczną ich beładnego ruchu cieplnego. Uzyskana w ten sposób średnia energia kinetyczna elektronów plazmy może przyjmować wartości, które przewyższają średnią energię kinetyczną cząstek elektrycznie obojętnych. Stan nierównowagowy plazmy utrzymuje się dzięki dopływowi energii od

przepływającego przez nią prądu wyładowania. Zanik zewnętrznego pola elektrycznego powoduje dejonizację gazu, co jest równoznaczne zanikowi plazmy.

Dla nieizotermicznej plazmy wyładowań elektrycznych ważną wielkością jest średnia energia kinetyczna elektronów. Energię tę można przyrównać do średniej energii kinetycznej cząstek gazu, które mają maxwellowski rozkład prędkości, odpowiadający określonej temperaturze. Wartość tej temperatury nazwano temperaturą gazu elektronowego plazmy, mimo że w nieizotermicznej plazmie nie ma równowagi termodynamicznej. Temperatura gazu elektronowego ma więc charakter umowny i na podstawie jej wartości nie można wyciągnąć żadnych wniosków opartych na prawach termodynamicznych. Podobnie, nie można prowadzić obliczeń termodynamicznych na podstawie temperatury obojętnych składników plazmy nieizotermicznej.

Gdy energia oddziaływania między cząstkami jest mała w porównaniu z energią cieplną, plazma, z punktu widzenia termodynamiki, zachowuje się jak gaz doskonały. Można wtedy, z pewnym przybliżeniem, zakładać maxwellowski rozkład prędkości i boltzmannowski rozkład energii cząstek. Jednakże z samego charakteru plazmy wynika, że obraz oddziaływania przez zderzenia par cząstek trzeba uzupełnić, a w skrajnych przypadkach zastąpić, obrazem oddziaływania kolektywnego (zbiorowego), to znaczy oddziaływania każdej cząstki z wieloma innymi jednocześnie, gdyż siły działające między naładowanymi cząstkami plazmy są siłami elektrostatycznymi. Należy również pamiętać, że plazma, w odróżnieniu od gazu obojętnego, przewodzi prąd elektryczny, z czego wynika jej specyficzne zachowanie się w polu magnetycznym.

Parametry wyładowania łukowego takie, jak ciśnienie gazu, temperatura elektronowa, prąd łuku nie są wyróżnikami rodzaju plazmy. Dla plazmy nietermicznej charakterystyczna jest dużo wyższa temperatura elektronów w porównaniu z temperaturą gazu, jako wynik coraz większej różnicy między ilością elektronów i atomów i coraz mniejszej liczby zderzeń. Parametry plazmy nietermicznej (o małym natężeniu prądu) i plazmy termicznej (o dużym natężeniu prądu) przedstawia tabela X.1.

Tabela 5.1. Porównanie parametrów wyładowania termicznego i nietermicznego [2]

| Parametry plazmy                           | plazma nietermiczna       | plazma termiczna          |
|--------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Stan równowagi                             | równowaga kinetyczna      | równowaga termiczna       |
| Gęstość elektronów $n_e$ , m <sup>-3</sup> | $10^{20} < n_e < 10^{21}$ | $10^{21} < n_e < 10^{23}$ |
| Ciśnienie $p$ , Pa                         | $10^{-1} < p < 10^5$      | $10^5 < p < 10^7$         |
| Temperatura elektronów $T_e$ , eV          | $0,2 < T_e < 2,0$         | $1,0 < T_e < 10$          |
| Temperatura gazu $T_g$ , eV                | $0,025 < T_g < 0,5$       | $T_g = T_e$               |
| Prąd łuku $I$ , A                          | $1 < I < 10$              | $10 < I < 10^4$           |
| Promieniowanie                             | Nieokreślone              | Równowagowe               |
| Stopień jonizacji                          | Nieokreślony              | Saha                      |

Nierównowagowa plazma nietermiczna jest trudna do teoretycznego opisu, ponieważ, w najlepszym razie, znajduje się w równowadze kinetycznej (plazma kwazirównowagowa), natomiast nie można przyjąć równowagi termicznej, a więc nie można analizować składu plazmy korzystając z równania Saha, i promieniowania, korzystając z równania Stefana-Boltzmanna.

Właściwości plazmy są najczęściej obliczane przy założeniu równowagi termicznej, które dla wielu przypadków jest prawdziwe, choć w pewnych warunkach nie można mówić o równowadze termicznej. Ponieważ obliczenia właściwości plazmy nierównowagowej są bardzo złożone, a w plazmotronach łukowych odchylenia od stanu równowagi są niezbyt duże [2, 3], stąd do wyznaczenia właściwości plazmy często stosuje się zależności prawdziwe dla stanów równowagi.

Inna klasyfikacja dzieli plazmę na:

- niskociśnieniową,
- wysokociśnieniową (termiczną).

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

Plazma wysokociśnieniowa występuje przy ciśnieniach powyżej 100 kPa (wnętrze kolumny łukowej, palniki wysokotemperaturowe, materia słoneczna). Jest ona, w większości wymienionych zjawisk i reaktorów, plazmą termiczną, lub w warunkach ziemskich zbliżoną do plazmy termicznej. Występuje w niej całkowita równowaga termodynamiczna wszystkich jej składników oraz równomierna koncentracja różnych rodzajów cząstek. Kolejnym ważnym kryterium klasyfikacji plazmy jest równowaga termodynamiczna cząstek, która oznacza równą w przybliżeniu energię elektronów, jonów i cząstek neutralnych. Mówiąc o równowadze termodynamicznej plazmy mamy zwykle na myśli tzw. równowagę lokalną. Wyładowania, będące źródłem plazmy w lokalnej równowadze termodynamicznej, charakteryzują się stosunkowo wysokimi temperaturami i wykorzystywane są tam, gdzie wymagane jest ciepło, a więc przy cięciu, napylaniu czy topieniu, a w zastosowaniach analitycznych do odparowania materiału poddanego analizie chemicznej. Plazmę nierównowagową, natomiast wykorzystujemy tam, gdzie ciepło może niekorzystnie wpływać na proces technologiczny, a zatem w procesach wytrawiania, nanoszenia (depozycji) cienkich warstw materiałów, procesach plazmo-chemicznych, biotechnologiach, itp. Należy podkreślić, że jakkolwiek wysokie ciśnienie oznacza na ogół plazmę termiczną i równowagową a niskie nietermiczną i nierównowagową, to ostatecznym kryterium przesądzającym o klasyfikacji plazmy na termiczną i nietermiczną jest iloczyn ciśnienia,  $p$ , i odległości między elektrodami,  $d$ . Do takich nietermicznych i nierównowagowych wyładowań należą, zachodzące przy ciśnieniu atmosferycznym, wyładowania katodowe w mikro-otworach (mikro-geometriach – z ang. microhollow cathode discharges) oraz w kapilarach, które obecnie są przedmiotem zaawansowanych badań w wielu ośrodkach naukowych na świecie [4, 5-15, 18].

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

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

- skład chemiczny gazu roboczego, który decyduje o rodzaju i energiach aktywnych cząstek plazmy (elektronów, atomów, molekuł, jonów, rodników),
- ciśnienie - w zakresie od niemal próżni do ciśnienia atmosferycznego; wyższe prowadzi do zmniejszenia drogi swobodnej cząstek plazmy i równowagi termodynamicznej,
- strukturę pola elektromagnetycznego; zewnętrznie wzbudzone pole elektryczne i/lub magnetyczne wykorzystuje się do przyspieszania, grzania, kompresji i kierowania cząstek plazmy,
- geometrię wyładowania - brak lub obecność elektrod, obecność dielektryka, objętość przestrzeni wyładowczej - wyładowania w małej objętości oznaczają odejście od równowagi termodynamicznej,
- parametry układu zasilającego (moc, napięcie, częstotliwość, liczba faz, kształt napięcia zasilającego, impedancja wewnętrzna układu zasilania).

W plazmie nietermicznej większość energii elektrycznej wykorzystywana jest na wytwarzanie wysokoenergetycznych elektronów, nie zaś na podgrzewanie gazu. A zatem, energia plazmy jest kierowana na dysocjacje wywołaną zderzeniami z elektronami i jonizację gazu w celu wyprodukowania rodników, które rozkładają toksyczne cząsteczki gazu. W języku potocznym mówimy, że w plazmie nietermicznej elektrony są „gorące”, zaś pozostałe cząstki plazmy są „zimne” - mogą mieć temperaturę otoczenia i niższą. W wielu zastosowaniach, zwłaszcza przy usuwaniu bardzo rozcieńczonych substancji zanieczyszczających powietrze, technika zastosowania plazmy niskotemperaturowej jest najbardziej odpowiednia i niezastąpiona, ze względu na selektywność energii i możliwość usuwania kilku zanieczyszczeń powietrza jednocześnie. W innych zastosowaniach, gdy występują mieszane rodzaje odpadów, wykorzystuje się plazmę termiczną do spalania całkowitego odpadów, łącznie z pojemnikiem, a następnie plazmę niskotemperaturową do oczyszczenia gazów powstałych w procesie spalania. Dotychczas przebadano wiele typów reaktorów plazmy niskotemperaturowej wykorzystywanych w procesach związanych z ochroną środowiska. Potencjalne możliwości tych urządzeń potwierdzono niejednokrotnie przy usuwaniu tlenków azotu NO<sub>x</sub>, dwutlenku siarki SO<sub>2</sub> z gazów spalinowych, metali ciężkich i lotnych substancji organicznych powstających w procesach malowania, lakierowania i procesach chemicznych [16,17, 19].

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

Wśród zastosowań środowiskowych, najbardziej technologicznie zaawansowaną i stosowaną w praktyce jest technologia obróbki wody pitnej.

Niemal od początku XX wieku powstawały w Europie (Nicea 1907) i na Świecie (Los Angeles 1987) stacje obróbki wody, w których szkodliwy dla środowiska chlor był zastępowany ozonem wytwarzanym w wyładowaniach barierowych. Obecnie na świecie pracuje ponad 3000 instalacji ozonowania wody pitnej, w których ozonatory wytwarzają ponad 100 kg  $O_3$ /h a moce jednostkowe stacji ozonowania sięgają setek megawatów [11, 12]. W połowie dwudziestego wieku zaczęto powszechnie stosować ozonowanie wody basenowej.

Inne środowiskowe zastosowania ozonu generowanego w wyładowaniach barierowych w powietrzu bądź tlenie obejmują [16, 20, 26, 41, 45]:

- sterylizację powietrza, wody, gleby, powierzchni i opakowań – badane są różne typy wyładowań w powietrzu, nad powierzchnią wody i bezpośrednio w wodzie, szczególnie przy zasilaniu impulsowym; prowadzone są próby usuwania mikrobiologicznych zanieczyszczeń papieru, opakowań z tworzyw sztucznych, redukcji tlenków azotu z gazów spalinowych pochodzących ze spalania gazu naturalnego, usuwania tlenków azotu ( $NO_x$ ), dwutlenku siarki ( $SO_2$ ), metali ciężkich i lotnych substancji organicznych (VOC) powstających w procesach malowania, lakierowania, spalania odpadów poszpitalnych i w innych procesach chemicznych,
- recykling i usuwanie zanieczyszczeń – rozkład i spalanie odpadów organicznych, lotnych i stałych, gazów spalinowych z silników wysokoprężnych, zużytych baterii, płytek obwodów drukowanych, za pomocą plazmy łukowej i kwasilukowej,
- wspomaganie reakcji chemicznych – selektywne usuwanie acetyleny z etyleny, rozkład etyleny, trichloroetyleny, octanu etylu i toluenu, wytwarzanie wodoru gazowego i sadzy poprzez rozpad węglowodorów.

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

Biologiczne i medyczne zastosowania plazmy niskotemperaturowej wykorzystują bakterioobójcze właściwości wyładowań elektrycznych, a zwłaszcza wytwarzanych podczas tych wyładowań takich związków, jak ozon ( $O_3$ ), tlenek azotu ( $NO$ ) i nadtlenek wodoru ( $H_2O_2$ ).

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

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

Aktualnie, zastosowania biologiczne i medyczne obejmują [13, 20, 30, 31]:

- sterylizację żywych tkanek ludzkich i zwierzęcych i wspomaganie leczenia – zabijanie mikroorganizmów, zwłaszcza trudno usuwalnych przetrwalników bakteryjnych, bioodkazywanie za pomocą wyładowań w postaci ślizgającego łuku, wyładowań stałoprądowych w powietrzu, mechanizmy oddziaływania plazmy nietermicznej na bakterie, sterylizację niskotemperaturową w plazmie



- impulsowej; koagulację i sterylizację ran powierzchniowych, krwi, zastosowania w stomatologii, wspomaganie leczenia nowotworów skóry;
- sterylizację narzędzi medycznych - zwłaszcza elementów wykonanych z tworzyw sztucznych nieodpornych na wysoką temperaturę; wykorzystywana jest plazma impulsowa, mikrofalowa, w środowisku suchym i wilgotnym;
  - pokrywanie implantów i soczewek warstwami biokompatybilnymi - wytwarzanie i biologiczne zastosowania polimerów plazmowych w leczeniu i diagnostyce, poprawa właściwości i biokompatybilności cienkich warstw amorficznych na protezach dentystycznych, powierzchni tytanu, nanowarstw na soczewkach kontaktowych, osadzanie plazmowe kompozytowych, bioaktywnych powłok implantów wewnątrzkośnych;
  - inżynierię tkankową – plazma wspomaga wytwarzanie czynników bioaktywnych i leków, immobilizuje molekuly biologiczne, modyfikuje powierzchnie w celu regulowania zachowań komórki, poprawia adhezję krwi;
  - diagnostykę medyczną - wytwarzanie biosensorów na bazie polimerów i cienkich warstw amorficznych do analiz medycznych.

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

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

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

Układ zasilania, niezależnie od rodzaju wyładowań elektrycznych wykorzystywanych do generacji plazmy, przesądza o sprawności całego procesu plazmowego i, w konsekwencji, o możliwości jego przemysłowego zastosowania.

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

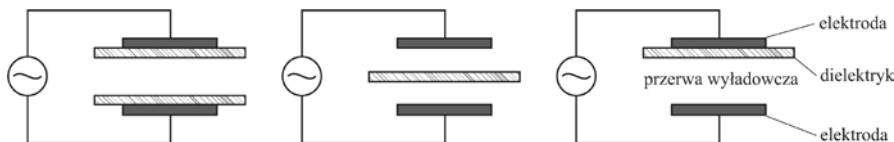
Plazmę dla celów technologicznych wytwarza się za pomocą wyładowań elektrycznych, które mogą występować w różnych formach, w zależności od geometrii elektrod i elektrycznego układu zasilania.

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

Dotychczas przebadano niemal wszystkie rodzaje wyładowań elektrycznych jako potencjalne źródło plazmy, począwszy od wyładowań w uwarstwionych układach dielektrycznych, poprzez wyładowania koronowe w silnie niejednorodnych polach elektrycznych, wyładowania jarzeniowe przy ciśnieniu atmosferycznym, wyładowania mikrofalowe a na wyładowaniach kwasi-łukowych i łukowych skończywszy. Ponieważ badania prowadzone w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej dotyczą układów zasilania reaktorów z wyładowaniami barierowymi i łukowymi [3, 4, 12,16, 17, 19, 20, 23, 25 - 27, 30 - 45], w dalszej części przedstawiono krótko te rodzaje wyładowań.

#### 5.4.1. Wyładowania dielektryczne barierowe DBDs

Wyładowania przy zmiennym wymuszeniu AC i w obecności bariery dielektrycznej są najczęściej wykorzystywane w technologiach nietermicznej plazmy. Typowe konfiguracje elektrod to układ płaski i cylindryczny (rys. 5.2), w których dielektryk (szkło, ceramika, polimer, substancja porowata), jest umieszczony na elektrodzie wysokonapięciowej, rzadziej na obu elektrodach, bądź między nimi, tworząc jedną lub więcej szczelin (przerw) wyładowczych. Powszechnie wykorzystywanym w praktyce reaktorem plazmowym z wyładowaniami barierowymi jest ozonator. Wytwarzany w nim, wskutek wyładowań w powietrzu lub w tlenie, ozon ( $O_3$ , trójcząsteczkowy tlen) znalazł zastosowanie, niemal od początku XX wieku, w procesach obróbki wody pitnej.



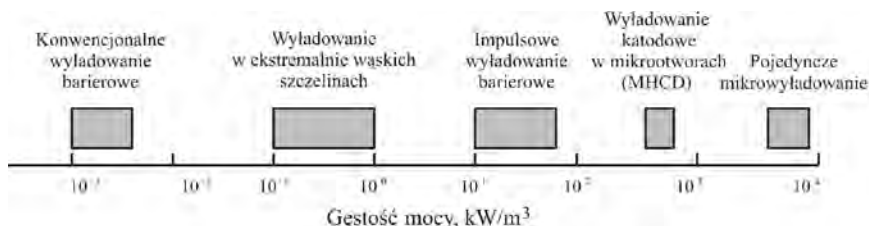
Rys. 5.2. Typowe konfiguracje elektrod reaktora z wyładowaniami barierowymi

Dielektryczne wyładowania barierowe wytwarzane są przy stosunkowo szerokim zakresie ciśnień, zwykle w od 0,1 do 1. atmosfery, przy napięciu przemiennym sięgającym w niektórych zastosowaniach nawet 100 kV i częstotliwości od kilku herców do setek kiloherców. Długość szczeliny wyładowczej, w zależności od zastosowań, może wynosić od 0,1 mm dla wyświetlaczy plazmowych, kilka milimetrów w ozonatorach i do kilku centymetrów w laserach  $CO_2$  [14]. Bariera dielektryczna jest w większości reaktorów DBD wykonana ze szkła, kwarcu, materiałów ceramicznych bądź polimerów.

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

Na rysunku X.3, opracowanym na podstawie [26], przedstawiono wartość gęstości objętościowej mocy w  $kW/m^3$  dla wybranych wyładowań zachodzących w obecności bariery dielektrycznej. Jak z niego wynika, największą gęstość mocy rzędu  $10^4 kW/m^3$  można osiągnąć w pojedynczym mikrowyładowaniu, natomiast w

klasycznym wyładowaniu barierowym uzyskiwane gęstości mocy są rzędu  $10^3 \text{ kW/m}^3$ , a więc kilka rzędów mniejsze.



Rys. 5.3. Gęstość mocy wybranych wyładowań w obecności bariery dielektrycznej [27]

Zwiększenie gęstości mocy wyładowań jest teoretycznie możliwe w dwojaki sposób:

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

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

#### 5.4.2. Wyładowania łukowe

Wyładowanie łukowe zachodzi w szerokim zakresie ciśnień, od 0,1 Pa do 10 MPa. Jego cechą charakterystyczną jest relatywnie niski spadek potencjału na elektrodach - zwykle poniżej 100V, wysoka gęstość natężenia prądu ( $1 \div 10^4$ ) A/cm<sup>2</sup> i znaczna intensywność świecenia kolumny łukowej. Charakterystyka prądowo-napięciowa wyładowania łukowego, przy ciśnieniu atmosferycznym ma 3 podstawowe zakresy (rys. 5. 4):

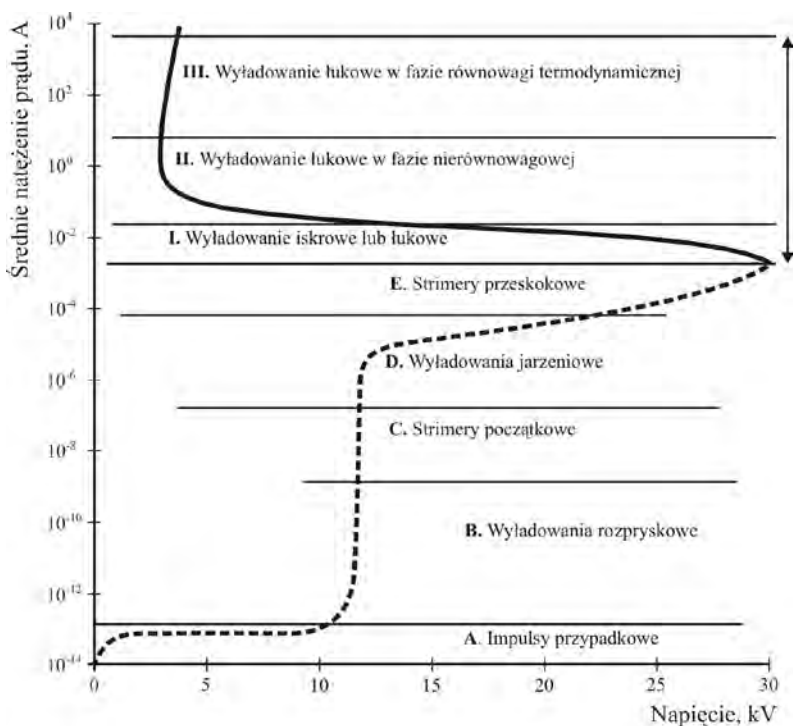
- zakres I, w którym niestabilne wyładowanie iskrowe przechodzi w niestabilne wyładowanie łukowe
- zakres II, w którym wyładowanie łukowe jest w stanie nierównowagi termodynamicznej. Gęstość elektronów w tym zakresie wynosi ( $10^{19} \div 10^{21}$ ) m<sup>-3</sup>, energia elektronów (0,2÷2) eV, średnia energia gazu (0,025÷0,5) eV oraz natężenie prądu (1÷50) A,
- zakres III - wyładowanie łukowe jest w stanie równowagi termodynamicznej. Gęstość elektronów w tym stanie wynosi ( $10^{22} \div 10^{25}$ ) cm<sup>-3</sup>, energia elektronów i cząsteczek gazu (1÷10) eV, zaś natężenie prądu (50÷1000) A.

Na rys. 5.4 pokazano również zakresy prądów i napięć dla innych niż łukowe wyładowań elektrycznych, które wykorzystuje się do wytwarzania plazmy nietermicznej.

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

do spalania odpadów stałych. Przy unieszkodliwianiu gazów przemysłowych (np. gazy wylotowe elektrowni lub elektrociepłowni), łuk elektryczny jest mało przydatny, bowiem wytwarzana nim plazma nie jest w stanie skutecznie spenetrować przestrzeni wypełnionej zanieczyszczonym powietrzem, w sposób umożliwiający usunięcie zawartych w nim zanieczyszczeń.

Z punktu widzenia zastosowań łuku w ochronie środowiska interesującym jest wyładowanie łukowe w fazie nierównowagowej (zakres II na rysunku 5.4). Przykładem takiego wyładowania może być ślizgające się wyładowanie łukowe, znane w literaturze światowej pod nazwą ślizgający się łuk („gliding arc”), w którym wyładowanie przemieszcza się wzdłuż elektrod wyładowczych ruchem ślizgowym, zmieniając istotnie swoje właściwości fizyczne a mianowicie: od charakterystycznych dla plazmy znajdującej się w stanie równowagi termodynamicznej do typowych dla plazmy nierównowagowej.. Reaktory plazmy nietermicznej ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, mogą być budowane jako dwu-, trzy- i wieloelektrodowe. Charakteryzują się prostą budową, niewielkimi wymaganiami w stosunku do układu zasilania, mogą pracować z praktycznie wszystkimi rodzajami gazów i ich mieszanin, reaktywnych i niereaktywnych, suchych i zawierających pary cieczy.



Rys. 5.4. Charakterystyka prądowo napięciowa wyładowania elektrycznego w powietrzu, ze szczególnym uwzględnieniem wyładowania łukowego

W dalszej części omówiono dwa rodzaje reaktorów nietermicznej plazmy:

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

Taki wybór wynika z kilku powodów: oba rodzaje wyładowań elektrycznych wytwarzają nietermiczną plazmę przy ciśnieniu atmosferycznym, konstrukcja reaktorów jest dobrze opracowana i stosunkowo prosta, potencjalny obszar zastosowań duży, zwłaszcza w procesach ochrony środowiska i w rozwijanych obecnie biotechnologiach, oba reaktory mogą być zasilane z podobnych źródeł wykorzystujących właściwości nieliniowych obwodów magnetycznych transformatorów i w końcu, oba rodzaje reaktorów plazmowych i ich układy zasilania są przedmiotem badań prowadzonych przez autorów monografii [3, 4, 11, 19 – 22, 29 - 45]

### 5.5. Reaktory plazmy nietermicznej

Główne cechy technologii plazmowych w zastosowaniach związanych z oczyszczaniem gazów wylotowych to: bezodpadowość, możliwość prowadzenia procesów oczyszczania gazów w dużej objętości przy ciśnieniu atmosferycznym, selektywność energii, potencjalnie duży obszar zastosowań. W tabeli 5.2 przedstawiono wybrane typy reaktorów plazmowych, ich główne zastosowania oraz sposoby ich zasilania w energię elektryczną

Tabela 5.2. Reaktory plazmowe i ich zastosowania

| Rodzaj reaktor plazmowego                                 | Zastosowania                                                                       | Sposób zasilania                                                                 |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Reaktory z wyładowaniami barierowymi – DBDs.              | Synteza ozonu, konwersja metanu.                                                   | Napięcie przemienne częstotliwości sieciowej i podwyższonej.                     |
| Reaktory z upakowaniem dielektrycznym- bad packed.        | Rozkład $\text{SO}_x$ i $\text{NO}_x$ , konwersja hydrokarbonów.                   | Napięcie stałe, impulsowe oraz przemienne.                                       |
| Reaktory koronowe.                                        | Filtracja pyłów, wytwarzanie ozonu.                                                | Napięcie impulsowe, stałe.                                                       |
| Reaktory z mikrowyładowaniami- hollow cathode discharges. | Sterylizacja, obróbka materiałów organicznych.                                     | Napięcie impulsowe, wysoka częstotliwość.                                        |
| Reaktory z wyładowaniami powierzchniowymi co-planar.      | Unieszkodliwianie tlenków azotu, lotnych substancji organicznych.                  | Napięcie sinusoidalne podwyższonej i wysokiej częstotliwości.                    |
| Reaktory łukowe (plazmotrony).                            | Syntezy chemiczne, topienie, spawanie, obróbka powierzchniowa.                     | Napięcie stałe, jednokierunkowe, napięcie sinusoidalne częstotliwości sieciowej. |
| Reaktory quasi-łukowe (ze ślizgającym się łukiem).        | Neutralizacja toksycznych gazów, unieszkodliwianie $\text{SO}_x$ i $\text{NO}_x$ . | Napięcie stałe, impulsowe oraz przemienne.                                       |
| Reaktory mikrofalowe.                                     | Usuwanie lotnych substancji organicznych VOC.                                      | Napięcie o częstotliwości rzędu mega i giga herców.                              |

Niezależnie od rodzaju wyładowań wykorzystywanych do generacji plazmy, reaktory plazmy nietermicznej dla zastosowań przemysłowych, łączy wiele cech wspólnych. Są to na ogół urządzenia o dużej mocy, wymagające zasilania energią elektryczną o wysokim napięciu od kilku do kilkunastu kilowoltów i częstotliwości sieciowej lub podwyższonej. Układy zasilania reaktorów plazmowych, stanowiące zawsze nieodłączną część systemu generacji plazmy, wymagają specjalnych metod projektowania i konstrukcji. Reaktory plazmowe, w których plazma wytwarzana jest za pomocą wyładowań elektrycznych w gazie są urządzeniami technologicznymi, bowiem plazmy nie można przechowywać ani transportować i musimy ją wytwarzać w miejscu, gdzie jest wykorzystywana w procesie technologicznym.

### **5.5.1. Reaktory z wyładowaniami barierowymi - ozonatory**

Terminu ozonator używa się zarówno do określenia urządzenia do wytwarzania ozonu, jak również do elementu wyładowczego, w którym w wyładowaniach dielektrycznych barierowych odbywa się właściwy proces syntezy ozonu. Ozonator jako urządzenie do produkcji ozonu, to zespół kilku elementów, takich jak: zasilacz, elementy wyładowcze, układy przygotowania i dostarczania powietrza bądź tlenu, układy zabezpieczeń.

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

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

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

Wymienione właściwości ozonu sprawiają, że jego zakres zastosowań wciąż się rozszerza. Obecnie, obok obróbki wody pitnej, wykorzystuje się ozon i plazmę wyładowań elektrycznych w procesach sterylizacji powietrza, wody, gleby, powierzchni i opakowań, redukcji tlenków azotu z gazów spalinowych pochodzących ze spalania gazu naturalnego, usuwania tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) dwutlenku siarki ( $\text{SO}_2$ ), metali ciężkich i lotnych substancji organicznych (VOC),

powstających w procesach malowania, lakierowania, spalania odpadów poszpitalnych i w innych procesach chemicznych.

### 5.5.2. Proces syntezy ozonu w wyładowaniach barierowych

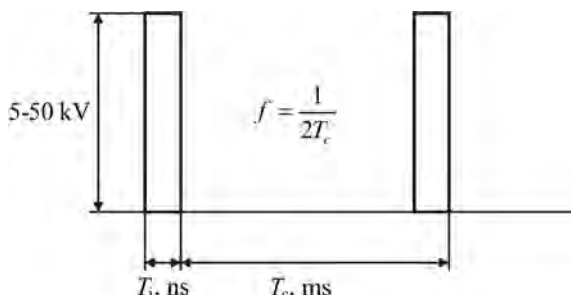
Proces formowania ozonu w reaktorze z wyładowaniami barierowymi można podzielić na 3 zasadnicze etapy (Tabela 5.3):

Tabela 5.3. Etapy procesu syntezy ozonu w wyładowaniach barierowych

| Zjawisko          | <i>Rozbijanie</i>               | <i>Rekombinacja</i>              | <i>Dyfuzja</i>                                                                          |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Reakcja chemiczna | $e + O_2 = 2 O$ $e + N_2 = 2 N$ | $O + O_2 = O_3$ $N + O_x = NO_x$ | $O_3$  |
| czas trwania      | $10^{-9}$ s                     | $10^{-6}$ s                      | $10^{-3}$ s                                                                             |

- Rozbijanie (jonizacja i dysocjacja), w którym po przekroczeniu przez napięcie zasilające wartości zapłonu wyładowania, następują bardzo szybkie procesy jonizacji, generujące nośniki ładunków, niezbędne do przepływu prądu, którymi w czystym tleny są elektrony oraz dodatnie i ujemne jony tlenu, natomiast w powietrzu, także jony azotu. Jednocześnie, elektrony, odpowiedzialne za przepływ prądu w mikrowyładowaniach, powodują dysocjację cząstek tlenu i azotu, zgodnie z reakcjami podanymi w tabeli 5.3. Procesy jonizacji i dysocjacji, należące do pierwszego etapu cyklu syntezy ozonu, są bardzo szybkie i nie trwają dłużej niż czas pojedynczego impulsu prądu, tj. kilka nanosekund.
- Rekombinacja, znacznie wolniejszy etap (rzędu kilku mikrosekund), w którym następuje formowanie cząstek ozonu. Gdyby wszystkie atomy tlenu, wytworzone w pierwszym etapie procesu, wzięły udział w formowaniu ozonu, to sprawność jego generacji byłaby największa. Badania wykazują, że jest to możliwe tylko dla bardzo słabych mikrowyładowań. Podczas silniejszych wyładowań i większych energii dostarczanych do przestrzeni wyładowań, zaczynają zachodzić dodatkowe reakcje, w wyniku których atomy tlenu mogą łączyć się w tlen dwucząsteczkowy, oraz cząstki ozonu reagują z atomami tlenu. Istnieje zatem pewna optymalna wartość intensywności wyładowań, zapewniająca maksymalną sprawność procesu syntezy ozonu.
- Dyfuzja, ostatni etap cyklu, w którym cząstki ozonu opuszczają szczelinę wyładowczą. Ten etap trwa milisekundy i przesądza o czasie trwania całego cyklu. Następny impuls energii powinien pojawić się dopiero po zakończeniu tego etapu, w przeciwnym razie, część uformowanych w poprzednim etapie cząstek ozonu ulegnie destrukcji i sprawność procesu syntezy ozonu w wyładowaniach barierowych zmaleje.

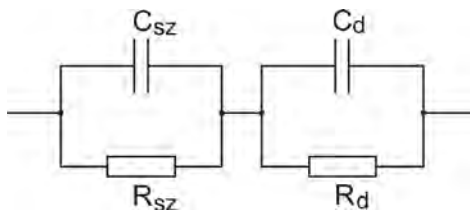
Dla tak scharakteryzowanego cyklu procesu syntezy ozonu w wyładowaniu barierowym, teoretyczny przebieg impulsu napięcia zapewniający jego realizację przy maksymalnej sprawności, przedstawiono na rysunku 5.5. Czas etapu dyfuzji, rzędu milisekund, przesądza o czasie trwania pojedynczego cyklu syntezy ozonu i pozwala oszacować częstotliwość napięcia zasilającego w granicach (50÷1000) Hz.



Rys. 5.5. Teoretyczny przebieg napięcia zasilającego zapewniający realizację cyklu procesu syntezy ozonu,  $T_i$  – czas trwania pojedynczego impulsu,  $T_c$  – czas trwania cyklu,  $f$  – wymagana częstotliwość impulsów

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

Reaktor z wyładowaniami barierowymi, jako odbiornik energii elektrycznej, stanowi obciążenie pojemnościowo-rezystancyjne ze zmienną pojemnością. Zmiana pojemności wynika stąd, że podczas fazy wyładowań, gdy szczelina gazowa przewodzi, o pojemności układu decyduje wartość pojemności  $C_d$  dielektryka stałego. Podczas przerw w wyładowaniach, pojemność elementu wyładowczego określona jest zastępczą pojemnością szeregowo połączonych: warstwy dielektryka  $C_d$  i nieprzewodzącej gazowej przestrzeni wyładowczej  $C_{sz}$ . Zatem, jeżeli w reaktorze nie zachodzą wyładowania, to odwzorowujemy go za pomocą uwarstwionego kondensatora rzeczywistego (Rys. 5.6).

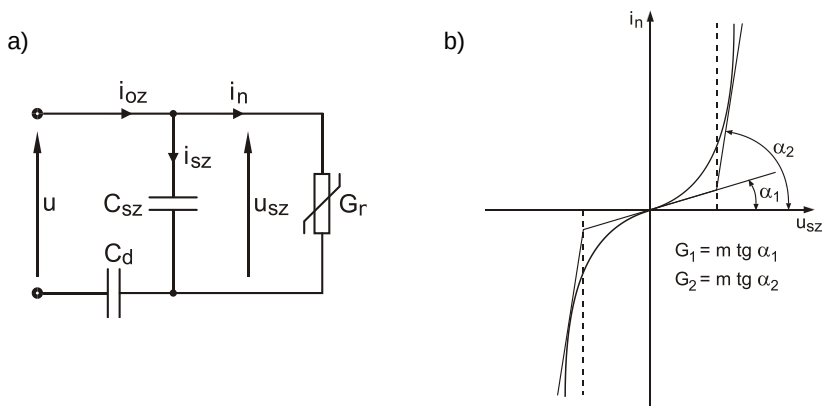


Rys. 5.6. Schemat zastępczy elementu wyładowczego bez wyładowań w szczelinie gazowej

Przy zasilaniu napięciem przemiennym, rozkład napięć w układzie z rysunku 5.6 podyktowany jest pojemnościowym prądem przesunięcia. Wówczas można pominąć w schemacie rezystancję modelującą prąd upływu dielektryka. Gdy napięcie na szczelinie wyładowczej przekroczy wartość niezbędną do zapłonu wyładowań, gaz zostaje zjonizowany i szczelina powietrzna traci swe właściwości izolacyjne. Na prąd przesunięcia nakłada się prąd przewodzenia i schemat zastępczy reaktora z wyładowaniami barierowymi wymaga uzupełnień. W wielu rozważaniach przyjmuje się, że szczelina powietrzna podczas wyładowań jest zwierana, co odpowiada założeniu, że napięcie zapłonu wyładowań  $U_z$  i napięcie gaśnięcia  $U_g$  są sobie równe. Nie jest to zgodne z wynikami doświadczeń. W rzeczywistości, napięcie gaśnięcia stanowi od  $(0,6 \pm 0,9) U_z$  i zależy od składu



chemicznego gazu zawartego w szczelinie, jego ciśnienia, rezystywności powierzchni elektrod i ich wymiarów. Bliższe wynikiom doświadczenia jest założenie, że napięcie na szczelinie jest stałe i równe napięciu zapłonu  $U_z$ . Mimo że proces zapłonu i gaśnięcia wyładowań jest nieustannie powtarzany w różnych miejscach szczeliny i w różnym czasie, to nawet podczas intensywnych wyładowań uśredniona wartość napięcia na szczelinie wyładowczej jest stała. Takie założenie stało się podstawą jednego z najczęściej stosowanych w praktyce schematów zastępczych reaktora z wyładowaniami barierowymi w którym, równolegle do pojemności modelującej szczelinę wyładowczą, włącza się idealne źródła napięcia o zmiennej biegunowości i sile elektromotorycznej równej napięciu zapłonu wyładowań. W pracy [18] zaproponowano schemat zastępczy reaktora z wyładowaniami barierowymi, przedstawiony na rysunku 5.7 w którym, równolegle do kondensatora modelującego pojemność przestrzeni wyładowczej, włączono nieliniową konduktancję o charakterystyce prądowo-napięciowej  $i_n=f(u_{sz})$ , odwzorowującej zmiany przewodności szczeliny wyładowczej przed i podczas wyładowań.

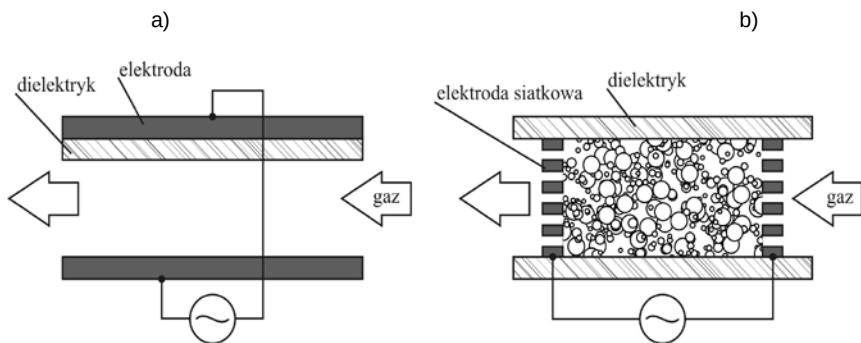


Rys. 5.7. Schemat zastępczy reaktora z wyładowaniami barierowymi (a), oraz charakterystyka prądowo-napięciowa nieliniowej konduktancji  $G_n$  (b)

Można także przyjąć, że zależność prądu od napięcia ma kształt charakterystyki przekaźnikowej (linia przerywana na rys. 5.7), co odpowiada założeniu stałego, równego  $U_z$ , napięcia na szczelinie podczas wyładowań.

#### 5.5.4. Energetyczne i elektryczne parametry reaktorów z wyładowaniami barierowymi

Wyładowania barierowe powstają w uwarstwionym układzie dielektrycznym pod wpływem przyłożonego napięcia zmiennego AC, najczęściej sinusoidalnego lub kwasi-sinusoidalnego, w konstrukcjach reaktorów przedstawionych na rysunku 5.8.



Rys. 5.8. Schematy reaktorów z wyładowaniami barierowymi: (a) ozonator, (b) reaktor z dielektrykiem o strukturze porowatej, zwanym upakowaniem dielektrycznym

Określenie sprawności procesu syntezy ozonu w wyładowaniu barierowym, wymaga wyznaczenia wartości energii elektrycznej dostarczanej do przestrzeni wyładowań. Natura mikrowyładowań, objawiająca się nanosekundowymi impulsami prądu przewodzenia nakładającymi się na znacznie wolniejszy prąd przesunięcia, utrudnia wyznaczenie energii metodą całkowania iloczynu chwilowych wartości prądu i napięcia. Wymaga to bowiem, już przy częstotliwości sieciowej, próbkowania przebiegów prądu i napięcia w co najmniej  $10^5$  punktach na jeden okres napięcia zasilającego. Najczęściej stosowaną metodą wyznaczania mocy jest korzystanie z figury Lissajous – zależności ładunku  $q(t)$  od napięcia  $u(t)$  (Rys. 5.9). Powierzchnia figury  $q=f(u)$  uzyskana oscylograficznie w układzie z rysunku 5. 7, jest miarą energii rozpraszanej w jednym cyklu zmian napięcia zasilającego w przestrzeni gazowej reaktora z wyładowaniami barierowymi.

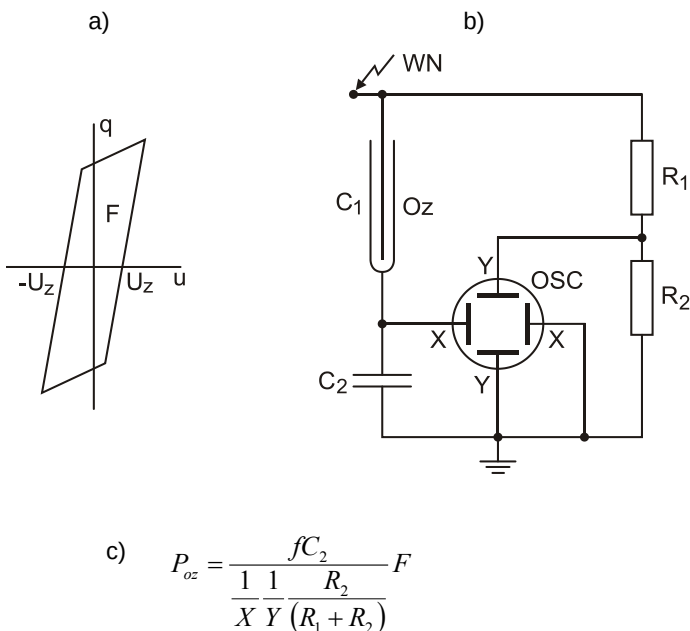
Analitycznie moc czynną wyładowań barierowych wyznacza się z zależności, zwanej formułą Manley'a [11]:

$$P = 4f C_d U_z \left( U_m - \frac{C_{sz}}{C_w} U_z \right), \quad C_w = \frac{C_d C_{sz}}{C_d + C_{sz}}. \quad (5.1)$$

Zależność (5.1) pozwala wyznaczyć ważną przy projektowaniu ozonatorów gęstość powierzchniową mocy czynnej  $p_{el}$  ( $W/m^2$ ), jako stosunek mocy czynnej  $P$  do aktywnej powierzchni wyładowczej elektrod  $S_{el}$ :  $p_{el}=P/S_{el}$ , od której zależy wydajność ozonatora. Zależność ta pokazuje, jak wpływają parametry układu zasilania w energię elektryczną na jej wartość. Wydajność syntezy ozonu, której miarą jest moc czynna elementu wyładowczego, zależy liniowo od napięcia i częstotliwości (Rys. 5.10). Zależność wydajności od napięcia wykorzystuje się w ozonatorach do regulacji ilości wytwarzanego ozonu, jednak podwyższanie napięcia zasilającego, w celu zwiększenia wydajności, jest ograniczone wytrzymałością na przebicie dielektryka stałego i zwykle nie przekracza 50 kV. Skutecznym sposobem poprawy wydajności ozonatora jest zwiększenie częstotliwości napięcia zasilającego. Jednakże, tu także występują ograniczenia, wynikające ze wzrostu

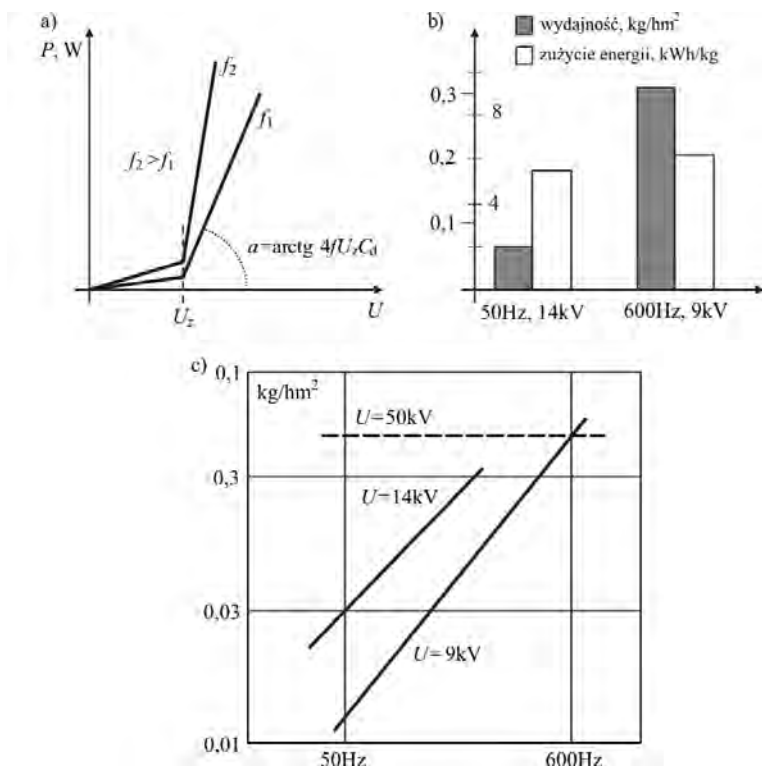
temperatury gazu w przestrzeni wyladowczej, co pogarsza przebieg procesu syntezy i zmusza do stosowania specjalnych systemów chłodzenia elektrod.

W praktyce przemysłowej stosowane są częstotliwości podwyższone (150, 600, 750 Hz), przy których chłodzona wodą jest elektroda uziemiona. Wyższe częstotliwości zasilania wymagają chłodzenia obu elektrod oraz stosowania innych niż woda mediów chłodzących. Stosowanie podwyższonej częstotliwości zasilania pozwala uzyskiwać wymaganą wydajność przy niższych wartościach napięcia, co sprzyja większej trwałości elementów wyladowczych. Wpływ napięcia i częstotliwości na moc, zużycie energii i wydajność ozonatora przedstawiono na rysunku 5.10. Jak wynika z zależności (5.1) i z rysunku 5.10a, moc jest liniową funkcją częstotliwości, natomiast wydajność (rys. 5.10 b i c) zmienia się z częstotliwością wolniej niż proporcjonalnie. W praktyce, podwojenie wydajności reaktora ozonu wymaga kilkunastokrotnego wzrostu częstotliwości i wówczas należy się liczyć z 15÷20 % wzrostem strat w postaci ciepła w elemencie wyladowczym, które musi być odprowadzone przez układ chłodzenia. W wytwarzaniu ozonu na skalę przemysłową, ważnym parametrem jest wydajność energetyczna procesu, mierzona ilością energii pobieranej z sieci przez układ zasilania dla wytworzenia 1kg ozonu (w kWh/kg), bądź ilością ozonu w uzyskaną z 1 kWh dostarczonej energii (kg/kWh).



Rys. 5.9. (a) Figura Lissajous  $q=f(u)$ , (b) układ do jej wyznaczenia, (c) zależność na moc czynną wyladowań, w której:  $F$  – pole powierzchni ograniczone krzywą w działkach,  $X, Y$  – nastawy na oscyloskopie w  $V/dz$ ,  $f$  – częstotliwość napięcia zasilającego, Hz,  $C_2$  – pojemność kondensatora włączonego w szereg z ozonatorem,  $\mu F$ ,  $R_1, R_2$  – rezystancje dzielnika napięcia,  $\Omega$

Z analizy mocy i sprawności układów zasilania ozonatorów [18] wynika, że straty energii w elementach układu zasilania (transformatorze, przetwornicy częstotliwości, dławikach, układach regulacji napięcia) są porównywalne z energią zużywaną przez elementy wyładowcze na wytworzenie ozonu, stąd tak ważnym zagadnieniem jest dobór i optymalizacja elektrycznego układu zasilania, zwłaszcza w przemysłowych reaktorach plazmy wyładowań barierowych.



Rys. 5.10. Wpływ amplitudy i częstotliwości napięcia zasilającego na moc czynną (a), jednostkowe zużycie energii (b) i wydajność ozonatora (c)

Przy analizowaniu parametrów energetycznych procesu syntezy ozonu nie można pominąć ważnego parametru syntezy, jakim jest koncentracja ozonu w g/m<sup>3</sup>. Jest ona dla danego urządzenia parametrem warunkującym sprawność procesu syntezy. Maksymalna sprawność generacji w g O<sub>3</sub>/kWh dla danego urządzenia występuje przy niemal zerowej koncentracji i maleje w miarę jej wzrostu, zatem przy projektowaniu ozonatora należy liczyć się z kompromisem pomiędzy sprawnością generacji ozonu i jego koncentracją, wymaganą przez dany proces plazmowy.

O sprawności reaktora plazmowego z wyładowaniami barierowymi decyduje nie tylko sprawność samych elementów wyładowczych i elementów układu

zasilania, ale także straty w innych elementach układu, do których zaliczamy systemy przygotowania i dostarczania gazu, chłodzenia, regulacji i zabezpieczeń. Czynniki, od których zależy sprawność energetyczna procesu wytwarzania plazmy w wyładowaniach barierowych można podzielić na:

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

W każdej z wymienionych grup czynników istnieją potencjalne możliwości doskonalenia procesu generacji nietermicznej plazmy w wyładowaniach barierowych. Ostatecznie jednak to układ zasilania w energię elektryczną decyduje o całkowitej sprawności procesu generacji nietermicznej plazmy za pomocą wyładowań barierowych.

#### **5.5.5. Zastosowanie nietermicznej plazmy w procesach sterylizacji gleby**

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

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

- metody fizyczne - bazujące na wysokiej temperaturze (pasteryzacja gorącym suchym lub wilgotnym powietrzem - autoklawy), mikrofales, solaryzacja, promieniowanie (UV, gamma), ultradźwięki,
- metody chemiczne - wykorzystujące substancje lotne, ciekłe i stałe (chloroform, tlenek etylu, bromek metylu, chlor, nadtlenek wodoru, chlorek rtęci, podchloryn sodu, dwutlenek chloru, chloraminy, chlor, brom i jod),
- biotechnologie - których działanie opiera się na pracy mikro-organizmów oraz wykorzystaniu szczepów bakteryjnych do wytwarzania enzymów i środków powierzchniowo- czynnych. Enzymy rozkładają zawarte w wodzie tłuszcze, a biologiczne środki powierzchniowo-czynne oczyszczają powierzchnię,
- procesy membranowe - odwrócona osmoza, ultrafiltracja, elektrodializa - w których separacja zanieczyszczeń odbywa się na poziomie molekularnym lub jonowym, wykorzystywane do odsalania, zmiękczenia wody, usuwania substancji organicznych.

Metody chemiczne są najczęściej stosowane w procesach sterylizacji gleby, ale pozostawiają w glebie toksyczne substancje chemiczne. Wykorzystywany powszechnie do sterylizacji gleby bromek metylu ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ), został zakwalifikowany

do związków odpowiedzialnych za efekt „dziury ozonowej” i stąd potrzeba poszukiwania alternatywnych metod sterylizacji i dezynfekcji gleby i zainteresowanie metodami plazmowymi.

Przedstawione badania na wykorzystaniem nietermicznej plazmy w procesach obróbki gleby, zostały zapoczątkowane i przeprowadzone w Japonii we współpracy z Laboratorium Przemian Energii Uniwersytetu Kumamoto.

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

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

- jego właściwości: ozon ma stosunkowo krótki czas połowicznego rozpadu (rzędu kilkunastu minut w temperaturze pokojowej) i obróbka gleby ozonem nie skutkuje powstawaniem w glebie substancji toksycznych, ozon bowiem rozpada się na tlen cząsteczkowy i jest natychmiast wykorzystywany w glebie,
- sposobu wytwarzania: ozon nie może być gromadzony, a musi być wytwarzany w miejscu, gdzie jest wykorzystywany, co uniemożliwia nagłe uwolnienie do atmosfery dużych jego ilości; inaczej niż podczas transportu takich substancji jak chlor, bromek metylu, fluor, etylen, itp.

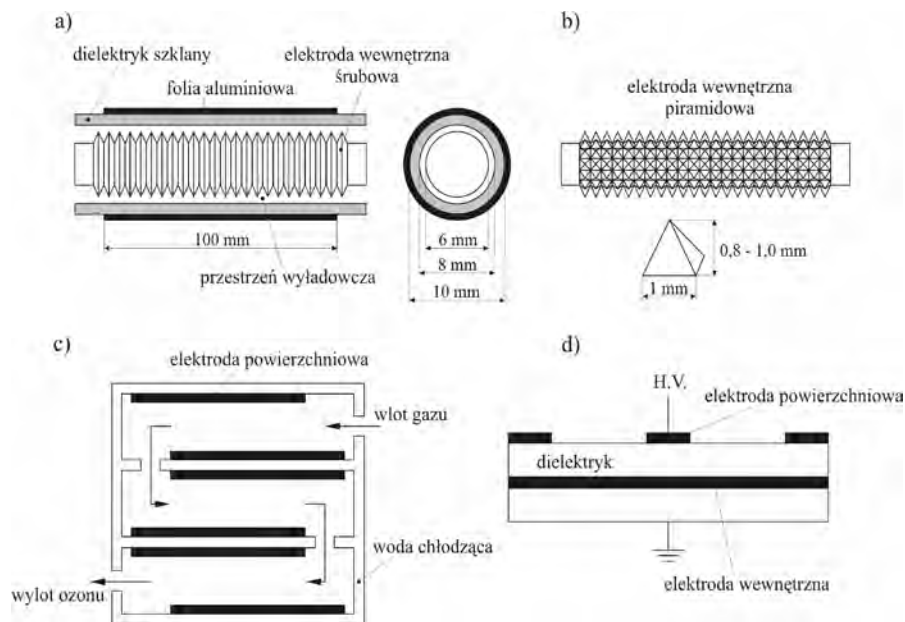
Badania nad plazmową sterylizacją gleby, których wyniki przedstawiono poniżej, obejmowały:

- wybór rodzaju reaktora plazmowego, jako źródła czynników sterylizacji (ozonu, tlenu azotu),
- określenie elektrycznych parametrów sterylizacji oraz zbadania możliwości sterowania parametrami procesu,
- wybór i przetestowanie metody analizy właściwości gleby poddanej obróbce plazmo-chemicznej,
- określenie wysokości dawki  $O_3/NO$  oraz wpływu czasu ekspozycji, konduktywności, temperatury i innych parametrów gazu plazmowego, na skuteczność procesu sterylizacji gleby.
- badanie wzrostu roślin w glebie poddanej obróbce plazmowej.

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

Wyładowania elektryczne barierowe i powierzchniowe generowane były w reaktorach, których geometrię przedstawiono na rysunku 5.11. Elektrody w kształcie śruby i piramidy wykonane były ze stali nierdzewnej i w większości badań dołączone były do zacisku wysokonapięciowego źródła. Elektrode niskonapięciową

(uziemia) stanowiła folia aluminiowa bądź miedziana umieszczona na/lub wewnątrz elektrody (rurki) szklanej (Rys. 5.12). Podczas eksperymentu, w którym badano wpływ chłodzenia elektrod reaktora na koncentrację ozonu i wydajność jego wytwarzania, elektroda śrubowa bądź piramidowa, wydrążone wewnątrz, były chłodzone wodą i wtedy stanowiły elektrodę uziemia, a zacisk źródła wysokiego napięcia dołączony był do zewnętrznej opaski miedzianej, umieszczonej na elektrodzie kwarcowej (Rys. 5.12).

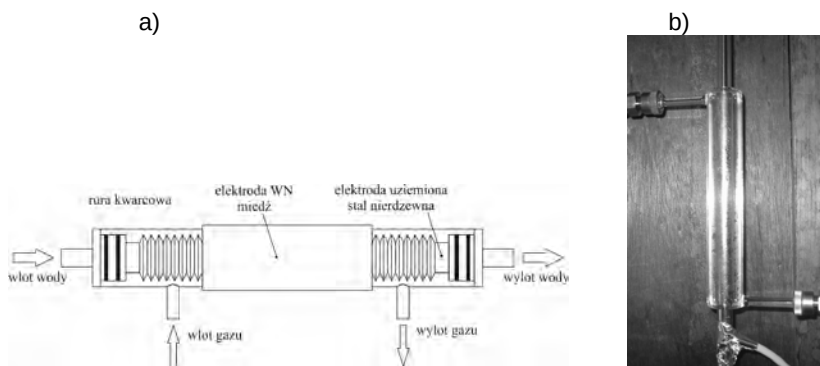


Rys. 5.11 Konfiguracje elektrod badanych reaktorów z barierą dielektryczną:

- a) reaktor z elektrodą kształcie śruby, b) elektroda piramidowa,
- c) reaktor z wyładowaniami powierzchniowymi, d) idea budowy elementu wyładowczego reaktora z wyładowaniami powierzchniowymi

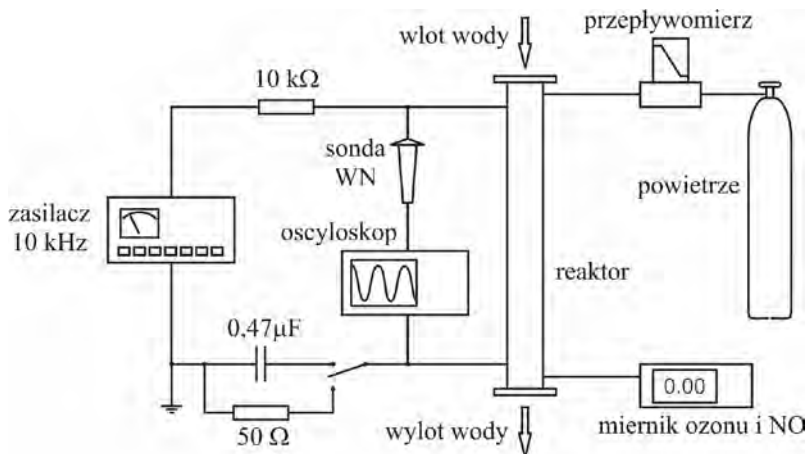
Pomiary wykonywano dla czterech długości elektrod reaktora: 100, 200, 300 i 400 mm, dla powietrza i tlenu jako gazu plazmowego, przy dwóch prędkościach przepływu gazu, przy ciśnieniu atmosferycznym. System pomiarowy przedstawiony na rysunku 5.13 składał się z generatora fali sinusoidalnej o regulowanej częstotliwości i napięciu, układu dozowania i regulacji przepływu gazów roboczych, mierników koncentracji ozonu i tlenków azotu oraz mierników napięcia, prądu i mocy.

Przebiegi chwilowe prądu i napięcia wyładowań barierowych rejestrowano oscylograficznie, a moc czynną wyładowań wyznaczano z krzywych Lissajous [11]. Warunki eksperymentu i parametry geometryczne badanych reaktorów zestawiono w tabeli 5. 4.



Rys. 5.12. (a) Ozonator z elektrodą śrubową chłodzoną wodą, (b) zdjęcie ozonatora laboratoryjnego

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



Rys. 5. 13. Schemat układu pomiarowego

Koncentracje ozonu i tlenu azotu, wprowadzanych do próbek gleby, wynosiły od 100 ppm do 50 000 ppm [42]. Badano także głębokość, na jaką gaz plazmowy penetruje próbkę gleby oraz wpływ jego czasu kontaktu na właściwości biologiczne, fizyczne i chemiczne gleby. Parametry gleby (kwasowość pH, przewodność elektryczną EC, zawartość związków azotu  $\text{NO}_3\text{NH}$  i  $\text{NH}_3\text{NO}$  oraz temperaturę) mierzono umieszczając w zbiorniku z glebą dwa zestawy czujników (rys. 5.14).

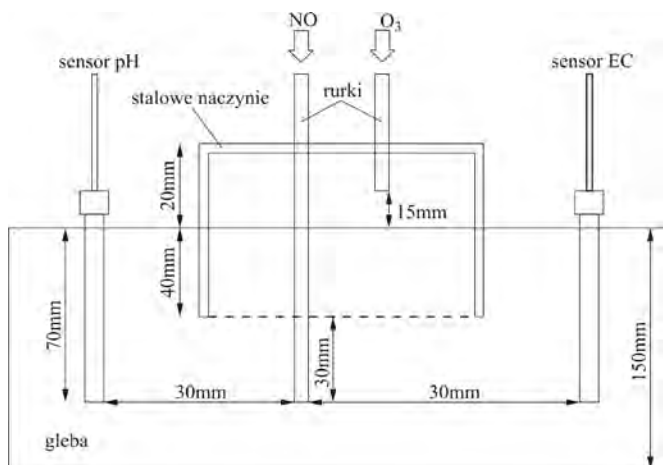


Koncentrację ozonu  $O_3$  oraz tlenków azotu  $NO$  i  $NO_x$ , zmierzone w funkcji napięcia wyładowania dla trzech jego częstotliwości dla prędkości przepływu powietrza równej 1 lit/min, przedstawiono na rysunkach X.15, X.16 i X.17. Wzrostowi częstotliwości napięcia zasilającego towarzyszy spadek koncentracji ozonu i wzrost koncentracji tlenków azotu. Dla częstotliwości 30 kHz i 50 kHz koncentracja ozonu w  $g/m^3$  była bliska zeru. Z punktu widzenia koncentracji ozonu optymalna częstotliwość zasilania wynosiła 10 kHz i dalsze badania były prowadzone dla tej częstotliwości.

Tabela 5.4. Parametry geometryczne reaktora i warunki eksperymentu

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

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

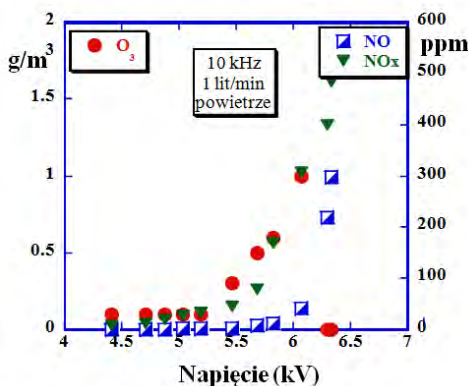


Rys. 5.14. Rozmieszczenie sensorów pH i EC w zbiorniku z glebą

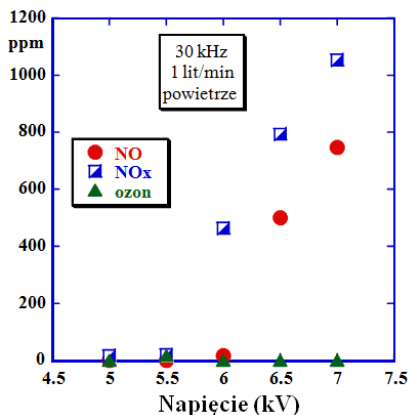
Wytwarzany w wyładowaniu barierowym tlenek azotu  $NO$ , jest aktywnym, choć niestabilnym, rodnikiem o podobnych właściwościach bakteriobójczych i dezynfekujących jak ozon. Stężenie tlenu azotu  $NO$  w gazie wylotowym badanego

ozonatora rosło wraz z wartością napięcia i częstotliwości, osiągając wartość maksymalną równą 780 ppm przy  $f=30$  kHz i  $U=7$  kV (Rys. 5.16), przy czym wartość stężenia NO zależała od natężenia przepływu gazu. Jak wynika z rysunku 5.18, im większy przepływ gazu, tym mniejsze były wartości stężenia NO, i przy przepływie 3 lit/min, jego zawartość była pomijalnie mała. Koncentrację ozonu i tlenków azotu NO i NO<sub>x</sub>, w najkorzystniejszych warunkach pracy ozonatora (prędkość przepływu powietrza – 2 lit/min, częstotliwość 10 kHz), w funkcji mocy dostarczanej do przestrzeni wyładowań, przedstawiono na rysunku 5.19.

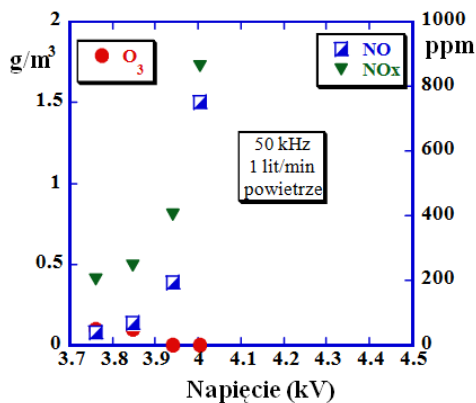
Na rysunku 5.20 przedstawiono zależność koncentracji ozonu w funkcji napięcia zasilającego, dla różnych kształtów elektrody wysokonapięciowej, a na rysunku 5.21 dla porównania koncentracje ozonu uzyskiwane w reaktorze z wyładowaniami powierzchniowymi (rys. 5.11 c i d).



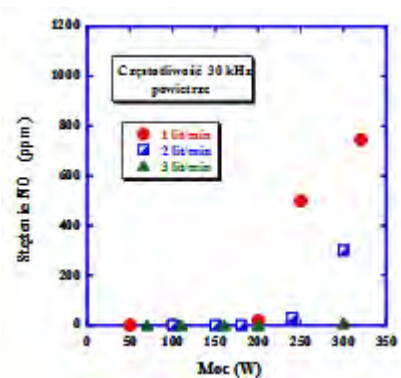
Rys. 5.15. Koncentracja O<sub>3</sub>, NO i NO<sub>x</sub> w funkcji napięcia dla  $f=10$  kHz



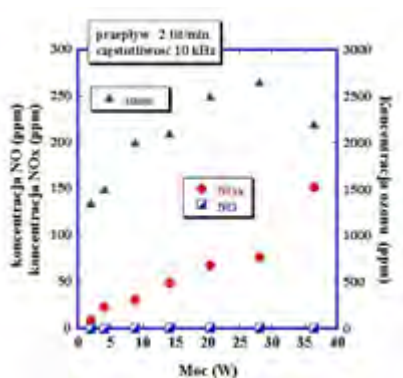
Rys. 5.16. Koncentracja O<sub>3</sub>, NO i NO<sub>x</sub> w funkcji napięcia dla  $f=30$  kHz



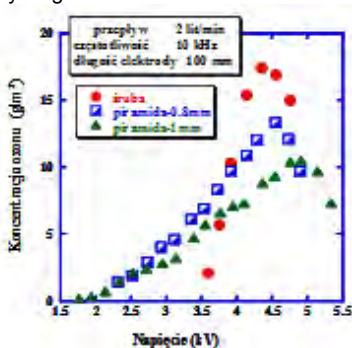
Rys. 5.17. Koncentracja O<sub>3</sub>, NO i NO<sub>x</sub> w funkcji napięcia dla  $f=50$  kHz



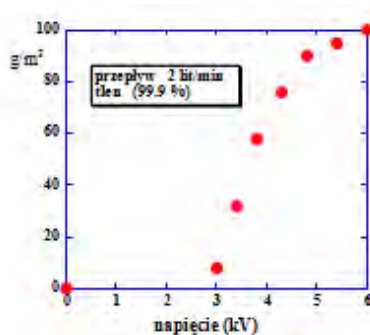
Rys. 5.18. Zależność stężenia NO w funkcji mocy wyładowania i prędkości przepływu gazu



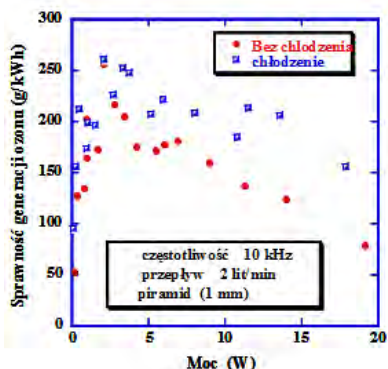
Rys. 5.19 Zależność koncentracji ozonu i tlenków azotu od mocy wyładowań



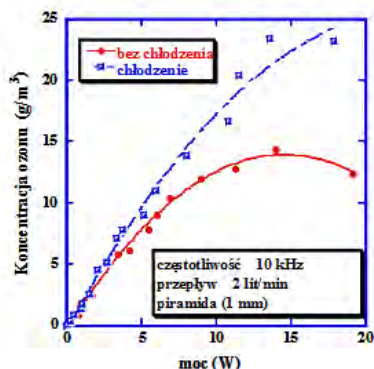
Rys. 5.20 Koncentracja ozonu w funkcji napięcia zasilającego dla różnych konfiguracji elektrod (rys. X.11 a i b)



Rys. 5.21. Koncentracja O<sub>3</sub> w reaktorze z wyładowaniami powierzchniowymi (rys. 5.11.c i d)



Rys. 5.22. Wpływ chłodzenia elektrody uziemionej na sprawność generacji ozonu

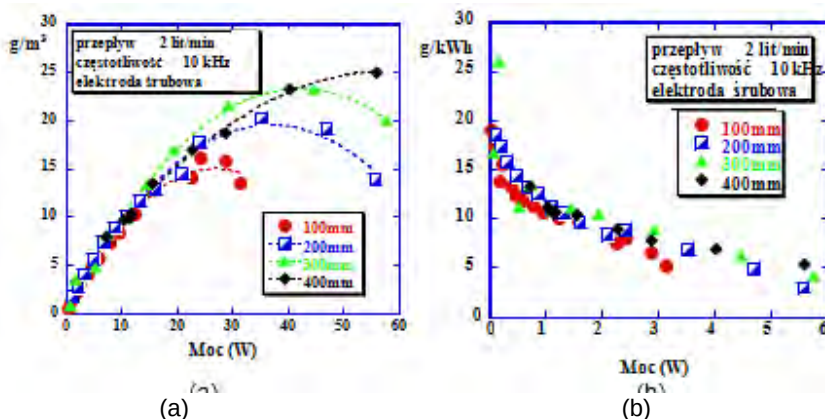


Rys. 5.23. Wpływ chłodzenia elektrody uziemionej na koncentrację ozonu

Jak wynika z rysunku 5.21, w wyładowaniach powierzchniowych, można uzyskać znacznie większe koncentracje ozonu, dla tych samych wartości napięć, ale możliwości regulacji koncentracji ozonu w całym zakresie zmian napięcia zasilającego są bardziej ograniczone.

Wpływ warunków chłodzenia elektrod na sprawność generacji ozonu i jego koncentrację przedstawiają rysunki 5.22 i 5.23. Jak z nich wynika koncentracja ozonu, która w układzie bez chłodzenia elektrod osiąga wartość  $14 \text{ g/m}^3$ , zostaje dzięki chłodzeniu wodnemu prawie podwojona ( $23 \text{ g/m}^3$ ), zaś sprawność generacji ozonu przy mocy  $P=15 \text{ W}$  wzrasta od wartości  $120 \text{ g/kWh}$  (bez chłodzenia elektrod) do  $200 \text{ g/kWh}$  w warunkach chłodzenia.

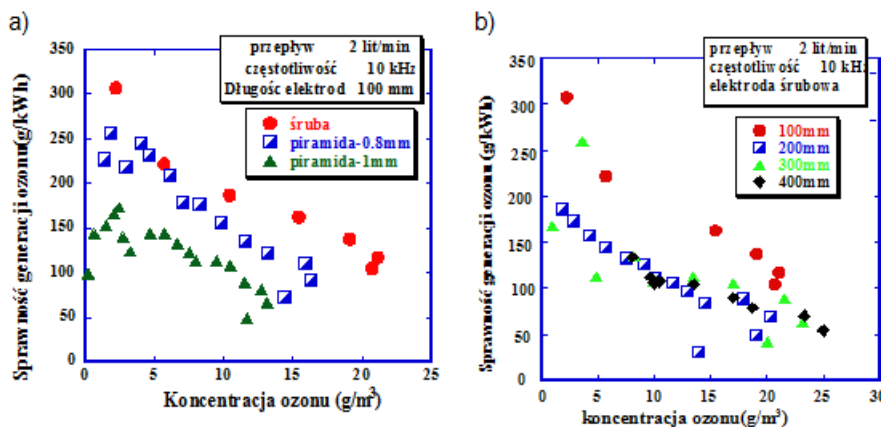
Zależność koncentracji ozonu, generowanego z tlenu w reaktorze z elektrodą śrubową i sprawność jego generacji, od długości elektrody wyładowczej, przedstawia rysunek 5.24.



Rys. 5.24. Wpływ długości elektrod na koncentrację ozonu (a) i sprawność jego generacji (b)

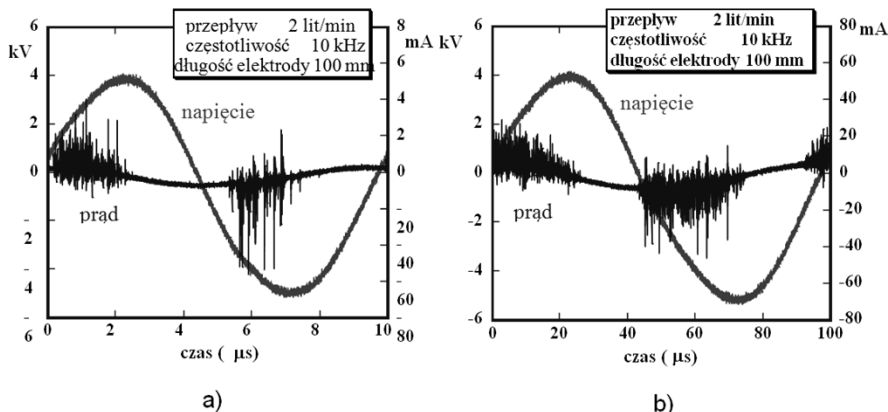
Wpływ długości elektrod na sprawność generacji ozonu jest niewielka, natomiast koncentracja ozonu (rys. 5.24 a) rośnie istotnie wraz z długością elektrod i jej maksimum przesuwa się w stronę wyższych mocy. Dla reaktora o długości elektrod równej 400 mm, maksymalna koncentracja ozonu jest równa  $25 \text{ g O}_3/\text{m}^3$  przy  $P = 55 \text{ W}$ . Ważnym parametrem, określającym skuteczność generacji ozonu w wyładowaniu barierowym, jest zależność sprawności jego generacji w  $\text{g/kWh}$  od koncentracji w  $\text{g/m}^3$ . Sprawność generacji ozonu zależy także od rodzaju elektrod i ich długości (Rys. 5.25). Jak wynika z przedstawionych na rys. 5.25 wyników, najlepszą sprawność generacji ozonu, przy akceptowalnej jego koncentracji, uzyskuje się w reaktorze z elektrodą w kształcie śruby o długości 100 mm. Wzrost długości elektrody daje większe koncentracje ozonu, ale przy mniejszej sprawności energetycznej procesu.

Przebiegi napięcia i prądu wyładowania barierowego w reaktorze z elektrodą śrubową i piramidową pokazano na rysunku 5.26. Wyładowanie ma strukturę włóknistą (z ang. filaments) i przebieg prądu składa się z nanosekundowych impulsów statystycznie rozłożonych w każdym półokresie zmian napięcia zasilającego. Ich liczba i amplituda zależą od wartości napięcia i częstotliwości a także od długości i kształtu elektrod. Zazwyczaj impulsy prądu nie są równomierne rozmieszczone w dodatnim i ujemnym cyklu napięcia zasilającego. Mają wyższą amplitudę i są mniej gęsto rozmieszczone, gdy elektroda wysokonapięciowa jest chwilową katodą, co jest szczególnie widoczne dla dłuższych elektrod.



Rys. 5.25. Sprawność generacji ozonu w funkcji jego koncentracji dla różnych kształtów elektrod (a) i ich długości (b)

Przy stałej długości elektrod podwyższenie napięcia zasilającego prowadzi do bardziej równomiernego rozmieszczenia impulsów prądu. Kształt elektrody wysokonapięciowej, przy stałej wartości napięcia i długości elektrody, ma także wpływ na przebieg prądu wyładowania (rys. 5.26a i b).



Rys. 5.26. Przebiegi prądu i napięcia w reaktorze o długości elektrod 100 mm, z elektrodą śrubową (a) i piramidową 0,8 mm (b), dla napięcia  $U=5,0$  kV

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

Wybrane wyniki obróbki gleby za pomocą ozonu o koncentracji 5000 ppm, czasie ekspozycji 30 min, przepływie gazu 1 l/min przedstawiono w tabelach 5.5 i 5.6. Stwierdzono ponad 98% spadek ilości bakterii w glebie oraz 87% zmniejszenie zarodników grzybów po obróbce plazmowej. Wśród bakterii zmniejszeniu uległa ilość odpowiedzialnych za tworzenie azotków (tzw. bakterii azotowych), co skutkowało zwiększeniem zawartości wskaźników  $\text{NH}_4\text{N}$  i  $\text{NO}_3\text{N}$ . Zawartość minerałów w glebie nie uległa istotnej zmianie po obróbce plazmowej.

Tabela 5.5. Wyniki obróbki gleby ozonem (\*)

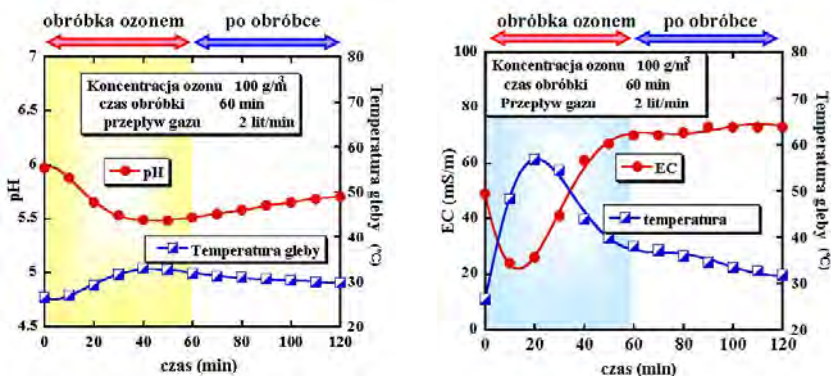
| Próbka gleby | wilgotność % | EC mS/m | pH  | $\text{NH}_4\text{-N}$ mg/100g | $\text{NO}_3\text{-N}$ mg/100g |
|--------------|--------------|---------|-----|--------------------------------|--------------------------------|
| bez obróbki  | 30.7         | 34      | 6.5 | 14.9                    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

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

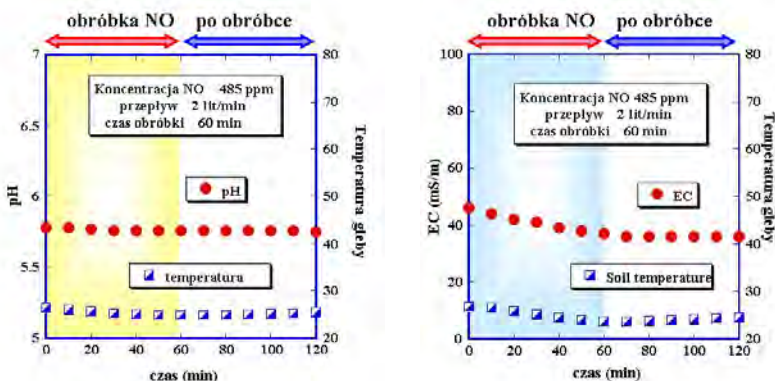
Tabela 5.6. Zawartość w glebie bakterii, grzybów i minerałów przed i po obróbce

| Próbka gleby | Bakterie<br>cfu/cc  | grzyby<br>cfu/cc    | Minerały, mg/100g             |                  |      |     |      |     |
|--------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|------------------|------|-----|------|-----|
|              |                     |                     | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO  | MgO | Fe   | Mn  |
| bez obróbki  | 3.8·10 <sup>7</sup> | 1.8·10 <sup>5</sup> | 674                           | 37               | 1112 | 913 | 4721 | 612 |
| po obróbce   | 8.5·10 <sup>5</sup> | 2.7·10 <sup>4</sup> | 700                           | 44               | 1076 | 946 | 4697 | 637 |

Jakość gleby charakteryzowana jest poprzez jej kwasowość pH, przewodność elektryczną EC, zawartość wody pF oraz związków azotu NH<sub>4</sub>-N i NO<sub>3</sub>-N. Wielkości te, wraz z temperaturą gleby, badano w czasie 60 minut wprowadzania ozonu bądź tlenu azotu NO do próbki gleby, oraz po obróbce ozonem podczas kolejnych 60 minut, a wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 5.27 i 5.28.

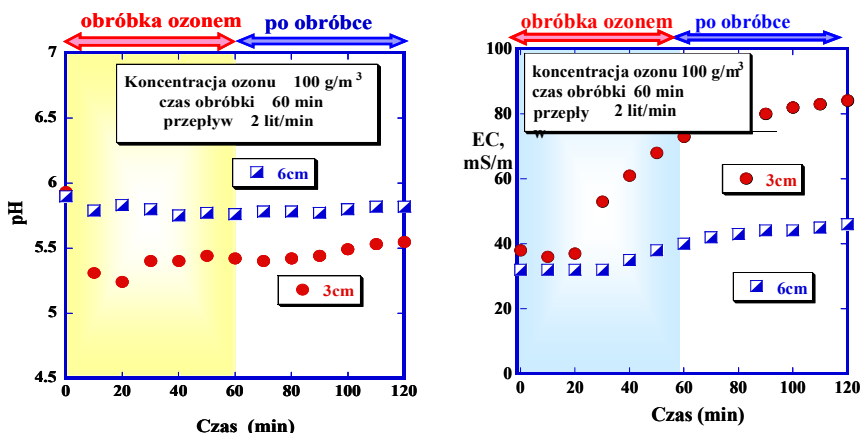


Rys. 5.27. Zmiany pH gleby (a) oraz EC i temperatury gleby (b) w czasie wprowadzania do gleby ozonu - 60 min obróbki ozonem i następne 60 min po obróbce



Rys. 5.28. Zmiany pH (a), EC i temperatury gleby (b), w czasie wprowadzania do gleby tlenu azotu NO - 60 min obróbki NO i następne 60 min po obróbce

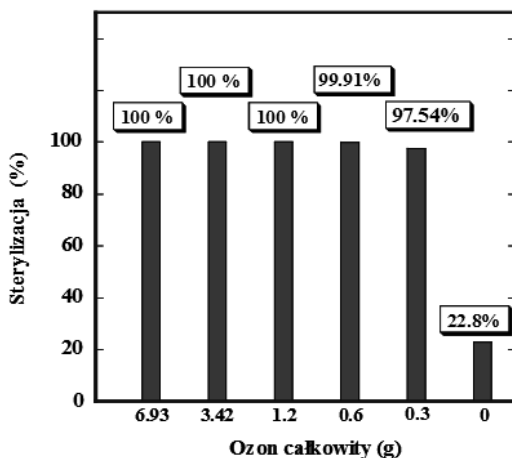
Po 40 minutach od wprowadzenia ozonu do próbki gleby (rys. 5.27), zaobserwowano skokowe zmniejszenie pH w odległości 3 cm od dyszy dozującej ozon, które następnie stopniowo wzrastało. Podobne zjawisko obserwowano przy wprowadzaniu do gleby NO (Rys. 5.29 a), ale po 20 minutach od rozpoczęcia dozowania. Rysunki 5.27 b, 5.28b i 5.29 b przedstawiają przewodność elektryczną EC próbki gleby, która także wykazuje skokowe zmiany w pierwszych 20 minutach obróbki ozonem/tlenkiem azotu i następnie stopniowo osiąga wartość ustaloną, większą niż przed obróbką ozonem i mniejszą dla obróbki tlenkiem azotu. Zaobserwowano także, towarzyszące zmianom pH i EC, zmiany temperatury gleby, prawdopodobnie związane z reakcjami egzotermicznymi zainicjowanymi ozonem.



Rys. 5.29. Zmiany pH gleby (a) i jej przewodności EC (b) w czasie i po obróbce ozonem w zależności od odległości od dyszy wprowadzającej ozon do próbki gleby

Badania skuteczności sterylizacji gleby za pomocą ozonu i tlenu azotu przeprowadzono wprowadzając do 50. gramowej próbki gleby zmienne dawki (stężenia) ozonu ( $0 \div 40 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ ) w czasie do 60 minut. Do sterylnych próbek gleby wprowadzano zarodniki grzybów z gatunku *Fusarium Oxysporum* w ilości  $10^6$  kolonii/ml i następnie po 72 godzinach oznaczano liczbę przetrwalników w jednostkach CFU (jednostek tworzących kolonie - z ang. colony forming units). Całkowitą dawkę ozonu w gramach wyznaczono jako iloczyn koncentracji ozonu, przepływu gazu i czasu trwania obróbki. Przykładowo, w próbce gleby zawierającej początkowo  $7,2 \cdot 10^6$  jednostek tworzących kolonie zarodnika grzyba *Fusarium Oxysporum*, po 60 minutach obróbki, w której użyto 6,39 grama ozonu o koncentracji  $38,5 \text{ g}/\text{m}^3$  przy przepływie gazu 3 lit/min, zmierzono tylko  $1,2 \cdot 10^2$  CFU zarodników grzybów. Na rysunku X.30 przedstawiono stopień sterylizacji próbki gleby w zależności od wypadkowej dawki ozonu w gramach. Jak wynika z rysunku X.30, oraz z tabeli 6.4 sterylizacja jest skuteczna, jeśli dawka przekracza 0,6 grama ozonu na 50 g gleby. Zarodniki grzyba *Fusarium Oxysporum* zostały niemal całkowicie unieszkodliwione po 10 minutowej obróbce ozonem o stężeniu  $20 \text{ g}/\text{m}^3$ . Po 20 minutach obróbki z tą samą dawką ozonu usunięto z gleby 86% bakterii.





Rys. 5.30. Stopień sterylizacji gleby ozonem w zależności od jego całkowitej dawki w gramach (próbka gleby zawierała początkowo od  $4 \cdot 10^6$  ÷  $7 \cdot 10^6$  zarodników grzybów)

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

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

Tabela 5.7. Sterylizacja gleby ozonem in-situ

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

Obecne w glebie, na skutek mikrobiologicznej aktywności bakterii azotowych oraz procesów nawożenia, tlenki azotu reagują z produktami wyładowania barierowego w powietrzu, co wpływa na fizyczne i chemiczne właściwości gleby a tym samym na wzrost roślin. Wstępne badania własne oraz innych autorów [13, 31 - 46], potwierdzają, że ozon i tlenki azotu wytwarzane w wyładowaniu barierowym w odpowiednio dobranych dawkach mogą sprzyjać wzrostowi roślin. Przeprowadzona przez badaczy japońskich [42] analiza ekonomiczna obróbki gleby ozonem dla następujących parametrów: koncentracja ozonu 100 g/m<sup>3</sup>, przepływ gazu 2 l/min, czas obróbki 60 min, sprawność generacji ozonu 100 g/kWh, przy aktualnej cenie 1kWh energii elektrycznej równej 20 centów (wg cen korporacji energetycznej Kyushu w 2008 r), wykazała, że obróbka 1m<sup>2</sup> gleby kosztuje około 2 dolary amerykańskie. Jest to koszt konkurencyjny w stosunku do konwencjonalnych chemicznych metod sterylizacji gleby. Biorąc pod uwagę, że metoda sterylizacji gleby ozonem jest przyjazna dla środowiska, a generatory ozonu mogą być zasilane ze źródeł odnawialnych (panele fotowoltaiczne, farmy wiatrowe), należy spodziewać się dalszych badań nad optymalizacją parametrów procesu i następnie szybkiego upowszechnienia tej metody obróbki gleby w praktyce.

## **5.6. Podsumowanie**

Plazmę nietermiczną i nierównowagową generuje się za pomocą wyładowań elektrycznych, przy czym niemal każdy rodzaj wyładowania może być wykorzystywany do wytwarzania plazmy o wymaganych przez proces plazmowy parametrach.

Generacja zimnej plazmy w warunkach próżni bądź wysokiego podciśnienia nie nastręcza istotnych trudności, nawet w komorach wyładowczych o dużej objętości, ale wytworzenie takiej próżni jest drogie i wymaga specjalnych konstrukcji reaktorów plazmowych. Stąd potrzeba poszukiwania reaktorów, w których zimną nierównowagową plazmę można generować w warunkach ciśnienia atmosferycznego.

Obiecującym źródłem plazmy dla zastosowań na skalę przemysłową jest ślizgające się wyładowania łukowe w układach wieloelektrodowych. Praca przy ciśnieniu atmosferycznym, niezbyt wysokie wymagania odnośnie zasilania w energię elektryczną, prosta budowa komór wyładowczych i możliwość pracy z niemal wszystkimi gazami sprawiają, że zastosowanie ślizgającego się wyładowania łukowego w technologiach plazmowych jest już dosyć powszechne i będzie się rozszerzało.

Nietermiczna plazma wyładowań barierowych jest stosowana w procesach sterylizacji i dezynfekcji mediów stałych, ciekłych i gazowych, w przemyśle rolno-spożywczym, przechowywaniu produktów spożywczych, stymulacji wzrostu roślin. Badania w tej dziedzinie prowadzone są przez wiele ośrodków naukowo-badawczych na świecie. Poszukuje się nowych źródeł plazmy o wysokiej wydajności czasowo-przestrzennej, doskonałone są istniejące konstrukcje reaktorów plazmowych i ich układy zasilania, pojawiają się nowe zastosowania procesów plazmowych w inżynierii środowiska, medycynie, nano- i biotechnologiach.

## 5.7. Literatura

- [1] Yu L., Laux C.O., Packan D.M., Kruger C.H.: Direct-Current Glow Discharges in. Atmospheric pressure Air Plasma, J. Appl. Phys., 91, 2002, 2678-2686
- [2] Laroussi M., Lu X., Malott C.M.: A Non-equilibrium Diffuse Discharge in Atmospheric Pressure Air, Plasma Sources Sci. Technol., 12, 2003, 53-56
- [3] Janowski T., H. D. Stryczewska, Power Supply Systems of Ozone Generators with Magnetic Frequency Multipliers, J. Adv. Oxid. Technol. Vol. 9, No.2, 2006
- [4] Arcimowicz, L.A. Czwarty stan materii, Wiedza Powszechna, Warszawa 1972
- [5] Celiński, Z., Plazma, PWN Warszawa 1980
- [6] Orajewski W. N., Plazma na Ziemi i w kosmosie, PWN Warszawa 1989
- [7] Kordus A., Plazma. Właściwości i zastosowania w technice, WNT Warszawa, 1985
- [8] Krall N. A., Trivelpiece A. W., Fizyka plazmy, WNT Warszawa 1979
- [9] on-thermal Plasma techniques for Pollution Control, Part. A: Overview, Fundamentals and Supporting Technologies, edited by M. Penetrante & Shirley E. Schultheis, NATO ASI Series G: Ecological Science, vol.34, part A and B, Springer-Verlag 1993
- [10] Pollo I., OZON. Właściwości, produkcja, zastosowania, Prace Instytutu Matematyki, Fizyki i Chemii, Politechnika Lubelska, Wydawnictwa Uczelniane, Seria A, Nr 4, 1983
- [11] Fridman G. et al, Use of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma Discharge for Coagulation and Sterilization of Surface Wounds, Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Chemistry, paper No 665, 2005
- [12] Kanazawa S., Kogoma M., Okazaki S., Moriwaki T., Stable glow plasma at atmospheric pressure, J. Phys. D: Appl. Phys. 21, 1988
- [13] Kogelschatz, U., Non-Equilibrium Plasmas at about Atmospheric Pressure. Proc. 27th ICPIG, (CD-rom) W1-355 2005
- [14] Stryczewska H., et all, Non-thermal Plasma Based Technology for Soil Treatment, Plasma Process.Polym, 2005
- [15] Janowski T., Stryczewska H. D., Electrical power losses and efficiency of ozone generator, Polish Journal of Applied Chemistry, vol. XXXIX, 4, PWN Warszawa 1995
- [16] Okazaki S., Kogoma M., Uehara M., Kumura Y., Appearance of a stable glow discharge in air, oxygen and nitrogen at atmospheric pressure using a 50 Hz source, J. Phys. D: Appl. Phys. 26, 1993
- [17] Stryczewska H. D., Analiza zintegrowanych zasilaczy elektromagnetycznych w urządzeniach wyładowczych, Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej, ELEKTRYKA, 1996
- [18] Stryczewska H.D.: Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska, Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej 2009.
- [19] Kogoma M., Okazaki S., Raising of ozone formation efficiency in a homogeneous glow discharge plasma at atmospheric pressure, J. Phys. D: Appl. Phys. 27, 1994
- [20] Okazaki S., Formation of atmospheric pressure plasma by mesh electrodes and my desire for its development, Transaction of the Material Research Society of Japan 30, 2005
- [21] Pollo I., Selected Design Criteria for Ozone Production, J. Adv. Oxid. Technol.

Vol. 7, No.1, 2004

- [22] Kogelschatz U., Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial applications, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1, March 2003
- [23] Janowski T., Stryczewska H. D. and Mizeraczyk J. (Guest Eds) Journal of Advanced Oxidation Technologies, Special Issue on selected papers from International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO'5, vo. 5, no 2, 2006
- [24] Stryczewska H. D., Janowski T., Zastosowania technologii nadprzewodnikowych i plazmowych w energetyce, Przegląd Elektrotechniczny, No 7/8, 2003
- [25] Yasuoka v, Endo Y., Ishii S., Experimental Study on Ozone Generation Using DC Driven Micro - Plasma, Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2003
- [26] Kogelschatz U., Advanced ozone generation, in: Process of Water Treatment, (Ed. S. Stucki) Plenum Press Publisher, 1988
- [27] Eliassen B and Kogelschatz U., Modeling and applications of silent discharge plasmas, IEEE Transactions on Plasma Science, 19(6), 309-323, 1991
- [28] Stryczewska H.D., Technologie plazmowe w procesach oczyszczania wody i powietrza, IV Konferencja Naukowa: Postępy w Elektrotechnologii, Jamrozowa Polana, 14 - 15 września 2000
- [29] Ebihara K., Ikegami T., Mitsugi F., Ikegami T, Stryczewska H.D., Gyoutoku Y., Gaseous Ozone Soil Sterilization and Biological Properties, 2008 Taiwan-Japan Bilateral Technology Interchange Project, The Workshop on the Applications of Plasma to Bio-Medical Engineering, Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan, December 15-17, 2008
- [30] Stryczewska, H.D., Ebihara, K., Ikegami T., Janowski, T, Gas Plasma Assisted Soil Sterilization in the Afterglow of Dielectric Barrier Discharges Generated in Air, Proc. International COE Forum on Plasma Science and Technology, 5-7 April 2004, Nagoya, Japan
- [31] Stryczewska H. D., Ebihara K., Gyoutoku Y., Tachibana M., Non-Thermal Plasma Based Technology for Soil Sterilization 9th International Conference High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry, Padova, Italy, August 23-34, 2004,
- [32] Stryczewska H. D., Ebihara K., Ikegami T., Janowski T., Gas plasma assisted soil sterilization in the afterglow of dielectric barrier discharges generated in air, International COE Forum on Plasma Science and Technology, Nagoya, Japan, 5-7 April 2004
- [33] Ebihara K., Shibuya Y, Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., Kubo K., Tachibana M., Soil treatment Process Using Ozone and NO generated by Electrical Discharges, Proceedings of 21st Symposium on Plasma Processing, SPP-21, Hokkaido, Japan, Jan. 28th –30th, 2004
- [34] Takayama M., Ebihara K., Stryczewska H. D., Ikegami T., Gyoutoku Y., Kubo K., Tachibana M., Ozone Generation by Dielectric Barrier Discharge for Soil Sterilization, The 7th APCPST (Asia pacific Conference on Plasma Science and Technology)& 17th SPSM (Symposium on Plasma Science and Materials) Conference, Fukuoka, Japan, June 29 – July 2, 2004

- [35] Stryczewska H. D., Ebihara K., Takayama M., Gyoutoku Y., Tachibana M., Non-Thermal Plasma-Based Technology for Soil Treatment, Plasma Processes and Polymers, vol. 2, No 3, March 31, 2005
- [36] Ebihara K., Takayama M., Ikegami T., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., Yokoyama T., Gunjikake N., Mizukami H., Araki S., Soil Sterilization Using Ozone Generated by Dielectric Barrier Discharge, The 17th International Symposium on Plasma Chemistry, Toronto – Kanada, August 7th - 12th, CD-R , 2005
- [37] Ebihara K., Takayama M., Ikegami T., Ogata K., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., Sakai T., Development of Agricultural Soil Sterilization Using Ozone Generated by High Frequency Dielectric Barrier Discharge, International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Nałęczów – Poland, 4 – 7 September 2005
- [38] Takayama M., Ebihara K., Stryczewska H. D., Ikegami T., Gyoutoku Y., Kubo K., Tachibana M., Ozone Generation by Dielectric Barrier Discharge for Soil Treatment, Thin Solid Film 506 – 507, 2006
- [39] Ebihara K., Takayama M., Ikegami T., Ogata K., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., Sakai T., Development of Agricultural Soil Sterilization Using Ozone Generated by High Frequency Dielectric Barrier Discharge, Journal of Advanced Oxidation Technologies, Vol. 9, no 2, July 31, 2006
- [40] Ebihara K., Takayama M., Stryczewska H. D., Ikegami T., Gyoutoku Y., Tachibana M., Wide Range Concentration Control of Dielectric Barrier Discharge Generated Ozone for Soil Sterilization, The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, vol. 126, no 10, 2006
- [41] Ebihara K., Ikegami T., Takayama M., Ishida H., Sakai T., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., High Dense Ozone Generation and the Supply System for Agricultural Soil Sterilization, 10th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry – HAKONE X, Saga, Japan, September 4 – 8, 2006
- [42] Ebihara K., Ikegami T., Takayama M., Ishida H., Sakai T., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., High Dense Ozone Generation and the Supply System for Agricultural Soil Sterilization, 3rd Polish-Japanese Hakone Group Symposium on Non-Thermal Plasma Processing of Water and Air, Saga, Japan, September 4 – 8, 2006
- [43] Stryczewska H. D., Ebihara K., Ikegami T., Takayama M., Dielectric Barrier Discharge Products as a Soil Processing Environment, 1st Central European Symposium on Plasma Chemistry, Gdańsk, May 28 – 31, 2006
- [44] Stryczewska H. D., Ebihara K., Ikegami T., Takayama M., Products of dielectric barrier discharge in screw and pyramid reactors as a soil processing environment, Transactions of the Institute of Fluid Flow Machinery 119, Gdańsk 2007

## 6. UKŁADY ZASILANIA REAKTORÓW PLAZMOWYCH

### 6. 1. Wstęp

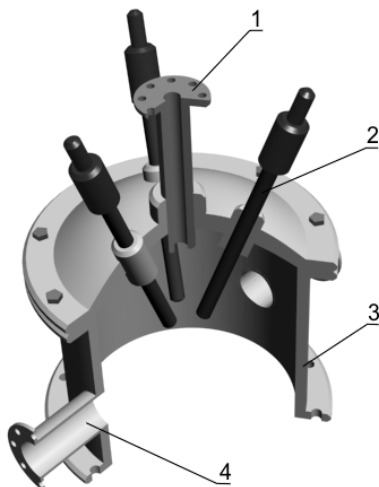
Reaktory plazmowe z łukiem elektrycznym, wykorzystywane są w technologiach przemysłowych od wielu lat. Ich główne zastosowania to spawanie, topienie, napyłanie, obróbka powierzchniowa materiałów, zwłaszcza trudnoobrabialnych, syntezy chemiczne. W ostatnim okresie wyładowania łukowe wykorzystuje się także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

Szybki rozwój technik generacji plazmy znacznie rozszerzył możliwości wykorzystania urządzeń plazmowych z łukiem elektrycznym. W wielu zastosowaniach źródłem plazmy jest łuk elektryczny stabilizowany ściankami reaktora i przepływającym gazem, wytwarzający strumień plazmy wypływający z dużą prędkością na zewnątrz reaktora plazmowego. Regulacja parametrów elektrycznych, cieplnych i gazodynamicznych strumienia plazmy, w takim reaktorze plazmowym, jest stosunkowo łatwa i może być prowadzona w szerokich granicach. Charakterystyczną cechą strumienia plazmy łuku stabilizowanego jest możliwość osiągnięcia bardzo dużych koncentracji energii i mocy sięgających  $40 \text{ kW/cm}^3$  w stosunkowo niewielkiej przestrzeni, dlatego nagrzewanie plazmowo-łukowe zaliczane jest do jednych z najbardziej obiecujących metod nagrzewania elektrycznego. Reaktory z łukiem elektrycznym wytwarzają plazmę termiczną, której cząstki znajdują się w stanie równowagi termodynamicznej. Przy unieszkodliwianiu gazów przemysłowych (np. gazy wylotowe elektrowni lub elektrociepłowni), łuk elektryczny, jako źródło plazmy jest mało przydatny, bowiem nie jest w stanie skutecznie spenetrować przestrzeni wypełnionej zanieczyszczonym powietrzem, w sposób umożliwiający usunięcie zawartych w nim zanieczyszczeń. Długość łuku swobodnego, jego położenie w przestrzeni, objętość oraz charakterystyki plazmy nim generowanej nieustannie zmieniają się w sposób losowy. Czyni to wyładowanie łukowe i plazmę nim wytworzoną medium słabo sterowalnym z punktu widzenia utrzymania wymaganych charakterystyk dla procesów prowadzonych z udziałem nietermicznej plazmy.

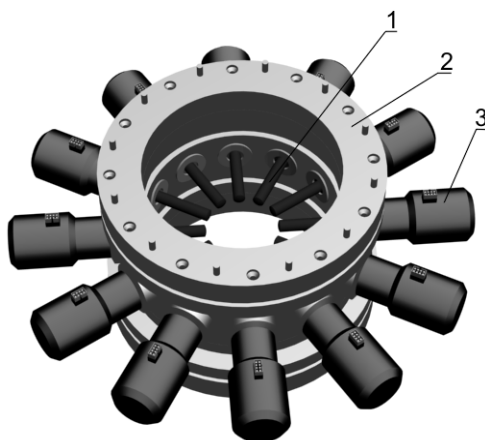
W procesach związanych z ochroną środowiska zastosowanie znajdują reaktory quasi-łukowe, generujące plazmę w fazie nierównowagowej i przy ciśnieniu atmosferycznym. Do takich należą reaktory plazmowe prądu przemiennego z łukiem ekspansyjnym. Przedstawiony na rysunku Y.1 rektor plazmowy umożliwia prowadzenie badań nad przemysłowym wykorzystaniem plazmy, powstającej w trójfazowym wyładowaniu łukowym, do rozbijania węgłowodoru na sadzę i wodór. Rozkład temperatury wewnątrz komory wyładowczej jest nierównomierny. W reaktorze o mocy 100 kW, w bezpośrednim sąsiedztwie wyładowania, odnotowuje się temperatury bliskie 7000 K, zaś na końcu komory wyładowczej temperatura osiąga około 1000 K [1]. 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.

Dwunastoelektrodowy reaktor plazmowy, przedstawiony na rysunku 6.2, przeznaczony jest do syntezy nanorurek węglowych [2]. Proces technologiczny

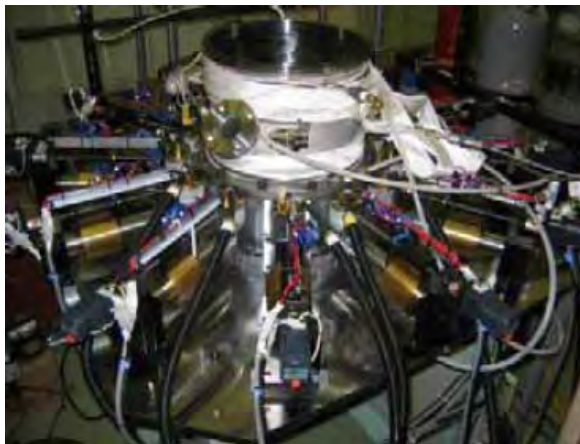
przewodzony jest w atmosferze helu o ciśnieniu 600 mmHg, a wyładowanie łukowe zachodzi przy napięciu  $(20 \div 45)$  V i prądzie  $(70 \div 100)$  A. W takich warunkach na stalowej płytce, umieszczonej we wnętrzu komory wyładowcowej, można otrzymać warstwy nanorurek o średnicach  $(20 \div 40)$  nm. Zastosowanie dwunastu elektrod pozwala na bardziej równomierne wypełnienie komory wyładowcowej plazmą, niż ma to miejsce w reaktorach o mniejszej liczbie.



Rys. 6.1. Reaktor trójelektrodowy [1]: 1 – dysza wlotowa gazu roboczego, 2 – elektroda grafitowa, 3 – komora wyładowcza, 4 – kanał wlotowy czynnika poddawanego obróbce plazmowej



Rys. 6.2. Schemat poglądowy konstrukcji dwunastoelektrodowego reaktora plazmowego [2]: 1 – elektrody grafitowe, 2 – komora wyładowcza, 3 – układ automatycznej regulacji długości elektrod



Rys. 6.3. Wnętrze komory wyładowczej dwunastoelektrodowego reaktora plazmowego [2]

Zdjęcie wnętrza komory wyładowczej podczas pracy reaktora dwunastoelektrodowego przedstawia rysunek 6.3. 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 6.4.



Rys. 6.4. Zdjęcie układów automatyki dwunastoelektrodowego reaktora plazmowego [2]

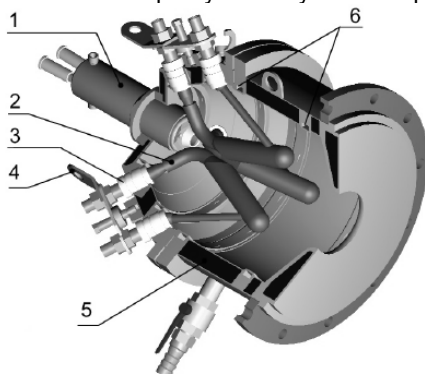
Innym rodzajem wyładowania z łukiem ekspansyjnym jest ślizgający się łuk elektryczny, znany w literaturze światowej pod nazwą „gliding arc”. Wyładowanie przemieszcza się wzdłuż elektrod wyładowczych ruchem ślizgowym, zmieniając istotnie swoje właściwości fizyczne - od charakterystycznych dla plazmy znajdującej się w stanie równowagi termodynamicznej do typowych dla plazmy nierównowagowej.



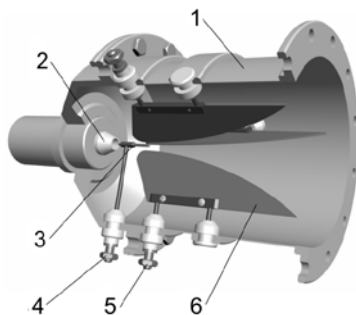
## 6.2. Reaktory ze ślizgającym się łukiem elektrycznym

Ślizgające się wyładowanie łukowe, jako źródło nietermicznej plazmy generowanej przy ciśnieniu atmosferycznym, zostało zaproponowane przez Albina Czernichowskiego i zespół z Laboratorium Fizyki Plazmy Uniwersytetu w Orleanie, we Francji w 1990 r. Jego główną cechą jest możliwość generacji nietermicznej plazmy bezpośrednio w zanieczyszczonym gazie, przy ciśnieniu atmosferycznym i w warunkach, w jakich gazy wylotowe są emitowane do atmosfery, bez konieczności ich wstępnej obróbki [3].

Plazmę ślizgającego się wyładowania łukowego, podobnie jak innych wyładowań łukowych, można generować przy napięciu stałym, przemiennym i impulsowym. Stosowane w przemyśle plazmotrony ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym są budowane jako dwu-, trzy- i wieloelektrodowe i często posiadają dodatkową elektrodę zapłonową. Przedstawiony na rysunku 6.5 reaktor plazmowy, wytwarza trójfazowe wyładowanie łukowe o mocy dochodzącej do 500 kW [4]. Zastosowane chłodzenie wodne elektrod i komory wyładowczej, umożliwia stosowanie w konstrukcji reaktora materiałów mało odpornych na wysokie temperatury.



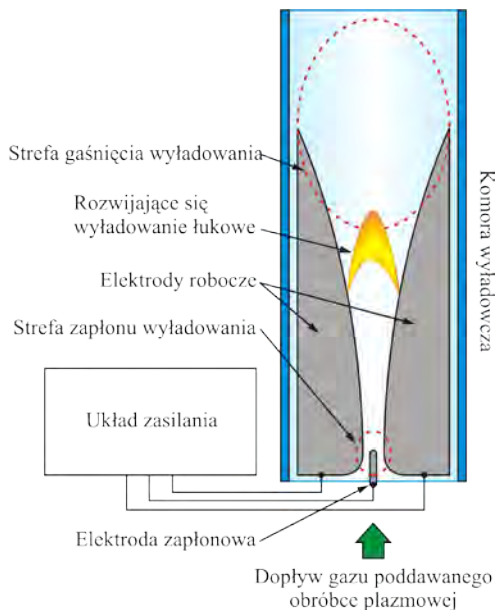
Rys. 6.5. Trójelektrodowy reaktor plazmowy [4]: 1 – jednofazowy reaktor plazmowy, 2 – elektroda robocza, 3 – materiał izolujący, 4 – zacisk zasilania, 5 – obieg wody chłodzącej, 6 – kanały dostarczania gazu



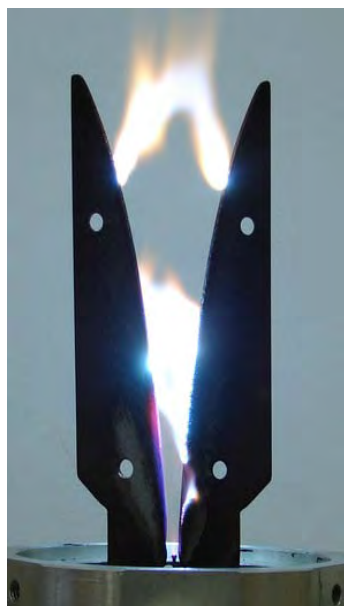
Rys. 6.6. Reaktor plazmowy z dodatkową elektrodą zapłonową: 1 – komora wyładowcza, 2 – dysza wlotu gazu, 3, 4 - elektroda zapłonowa, 5, 6 - elektroda robocza

Dodatkowo szybki ruch punktów przyczepienia łuków wzdłuż elektrod, głównie pod wpływem sił gazodynamicznych i w pewnym stopniu także elektrodynamicznych, nie powoduje miejscowego nagrzewania elektrod. Elementem inicjującym wyładowanie, w reaktorze z rysunku 6.5, jest niewielkiej mocy reaktor plazmowy wytwarzający strumień plazmy o koncentracji elektronów  $n_e=(10^{13}\div 10^{14})\text{cm}^{-3}$  skierowany do obszaru, w którym odległość pomiędzy elektrodami roboczymi jest najmniejsza. Koncentracja elektronów w strefie zapłonu wyładowania umożliwia pewny zapłon łuku elektrycznego na elektrodach roboczych. Taką samą funkcję spełnia elektroda zapłonowa w reaktorze trójelektrodowym przedstawionym na rysunku 6.6. Wytworzona nią niewielkiej mocy iskra elektryczna, jest wystarczająca do zjonizowania przestrzeni międzyelektrodowej, co ułatwia zapłon właściwego wyładowania między elektrodami roboczymi w każdym cyklu pracy reaktora.

Aby zapewnić nierównowagowe i nietermiczne warunki generowanej plazmy, napięcie zasilające zwykle zawiera się w granicach od 1kV do 2 kV, a prąd pary elektrod nie przekracza 10 A. Takie wartości napięcia i prądu nie są typowe dla wyładowania łukowego. Ponadto wymagane dla potrzymania 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.



Rys. 6.7. Schemat ideowy reaktora dwuelektrodowego



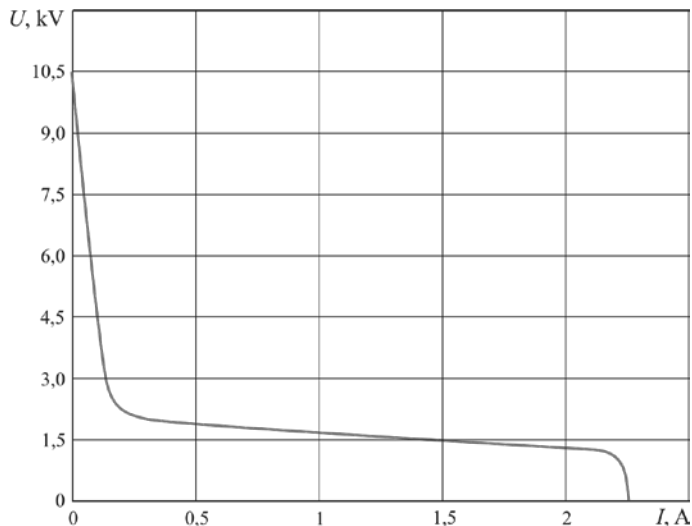
Rys. 6.8. Ślizgające się wyładowanie łukowe

Najprostszy konstrukcyjnie jest dwuelektrodowy reaktor plazmowy ze ślizgającym się łukiem, którego geometrię przedstawiono na rysunku 6.7. Reaktor składa

się z dwóch elektrod roboczych umieszczonych w komorze wyładowczej, przez którą przepływa z odpowiednią prędkością ( $>10\text{m/s}$ ) zanieczyszczony gaz, poddawany obróbce plazmowej.

Na rysunku 6.8 przedstawiono widok płonącego łuku w reaktorze dwuelektrodowym. Ze względu na małą odległość elektrod w strefie zapłonu, zwykle ( $1\div4$ ) mm, warstwy przyelektrodowe stykają się ze sobą powodując wystąpienie łuku krótkiego, w którym praktycznie nie obserwuje się kolumny łukowej.

Duże obciążenia cieplne w rejonie strefy zapłonu może powodować erozję elektrod. Można założyć, że w miejscu zapłonu, wyładowanie znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej. Pod wpływem sił gazodynamicznych wyładowanie przesuwają 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. Po zgaśnięciu wyładowania, następuje niemal natychmiastowa jego odbudowa w strefie zapłonu i cykl pracy reaktora powtarza się. Na czas trwania jednego cyklu ma wpływ wiele czynników, spośród których należy wymienić takie jak: wymiary i kształt elektrod, prędkość przepływu ośrodka gazowego przez komorę wyładowczą, temperatura panująca wewnątrz komory wyładowczej, skład chemiczny gazu, napięcie i natężenie prądu elektrod oraz częstotliwość napięcia zasilającego.



Rys. 6.9. Typowa charakterystyka statyczna napięciowo-prądowa ślizgającego się łuku

Z przedstawionej na rysunku 6.9 statycznej charakterystyki napięciowo-prądowej wynika, że napięcie zapłonu wyładowań (10,5 kV) ma wartość ponad

sześciokrotnie większą od wymaganego do ich podtrzymania (1,5 kV) przy znamionowym prądzie elektrod wynoszącym 1,5 A. Zwiększenie liczby elektrod w reaktorze plazmowym pozwala na wytworzenie obszaru plazmy o większej objętości. Stosuje się więc układy wieloelektrodowe lub połączenia kilku reaktorów szeregowo dla przepływającego gazu.

Jak wynika z badań [5, 6,14,18], nawet do 80% energii wyładowania ślizgającego się łuku jest wyzwolana w fazie nierównowagowej, co czyni je szczególnie przydatnym w technologiach oczyszczania gazów, emitowanych zwykle w dużych ilościach i przy ciśnieniu atmosferycznym.

W następnym rozdziale przedstawiono charakterystyki statyczne i dynamiczne trójfazowych reaktorów plazmowych, wyznaczone eksperymentalnie dla różnych gazów roboczych oraz różnych parametrów układu zasilania, zwracając szczególną uwagę na zjawiska związane z paleniem się łuku w układzie trójfazowym [10].

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

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

Charakterystyki wyznaczono dla trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową, (rys. 6.6), zasilanego z układu przekształtnikowego o regulowanej wartości napięcia i częstotliwości wyjściowej, poprzez transformatory podwyższające napięcie. Dane techniczne badanego układu zestawiono w tabeli 6.1. Charakterystyki trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową przedstawiono na rysunkach od 6.10 do 6.19. Pomiary wykonano dla trzech gazów roboczych: argonu, azotu i powietrza przy przepływie gazu przez dyszę plazmotronu wynoszącym  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  przy ciśnieniu normalnym. Elektroda zapłonowa zasilana była napięciem 15 kV o częstotliwości 20 kHz.

Minimalna wartość napięcia, które podtrzyma wyładowanie łukowe między elektrodami roboczymi reaktora plazmowego, jest różna dla różnych gazów roboczych. Dla argonu (Rys. 6.10) wartość napięcia podtrzymania wyładowania wynosi 250 V i jest prawie pięć razy mniejsza niż dla powietrza (1200 V) i azotu (1100 V) [10].

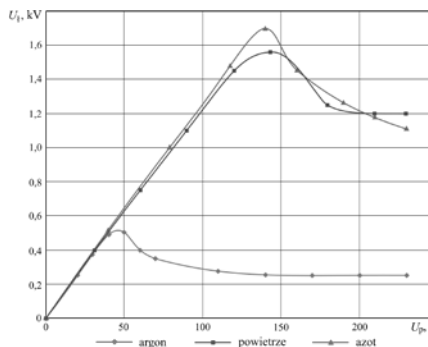
Tabela 6.1. Dane techniczne układu zasilania

| Transformatory                         |             |
|----------------------------------------|-------------|
| Napięcie pierwotne                     | 230 V       |
| Prąd pierwotny                         | 18 A        |
| Napięcie wtórne                        | 1,4 kV      |
| Prąd wtórny                            | 3 A         |
| Przekształtnik tyrystorowy<br>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<br>zapłonowy                     |             |
| Napięcie zasilania                     | 230 V       |
| Prąd zasilania                         | 0,25 A      |
| Napięcie wyjściowe                     | 15 kV       |
| Prąd wyjściowy                         | 40 mA       |
| Częstotliwość wyjściowa                | 20 kHz      |

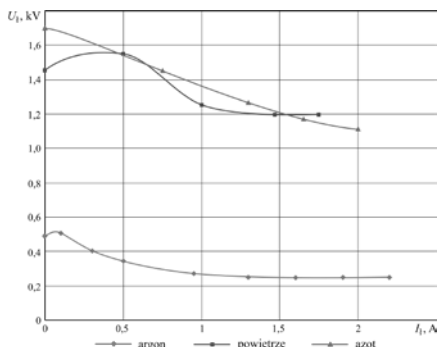
Jak wynika z charakterystyk statycznych, przedstawionych na rysunkach 6.11 do 6.14, moc ślizgającego się wyładowania łukowego i rezystancja przestrzeni międzyelektrodowej zmieniają się szerokich granicach wraz ze zmianami wartości prądu, napięcia, częstotliwości i rodzaju gazu roboczego, w którym występuje wyładowanie.

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

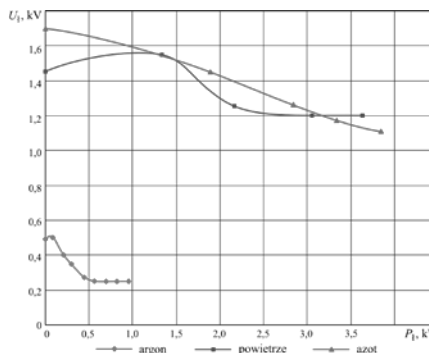
Na rysunku 6.16 przedstawiono zdjęcia ślizgającego się wyładowania łukowego w układzie trójelektrodowym, dla tych samych parametrów elektrycznych wyładowania (2,2 A i 250 V) oraz rodzaju gazu roboczego (argon) i jego przepływu ( $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Charakter wyładowania ulega istotnym zmianom dla różnych materiałów rdzenia (blacha transformatorowa, taśma amorficzna).



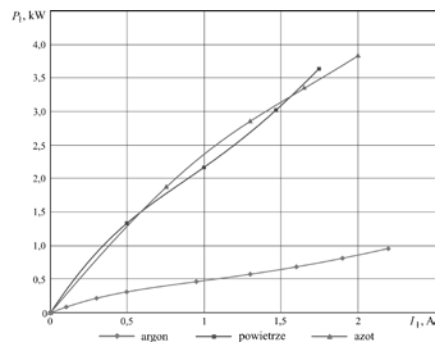
Rys. 6.10. Napięcie łuku  $U_l$  w funkcji napięcia zasilającego  $U_p$



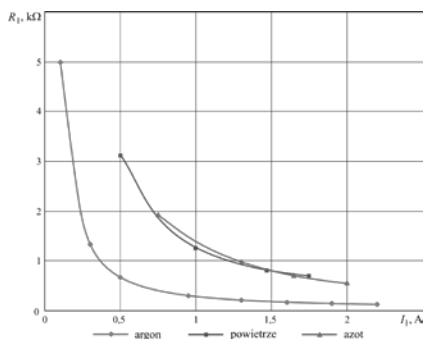
Rys. 6.11. Charakterystyki zmian napięcia łuku  $U_l$  w funkcji prądu łuku  $I_l$



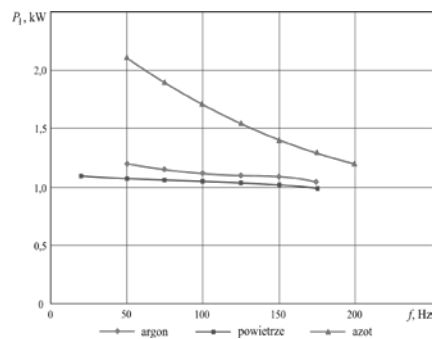
Rys. 6.12. Zmiana napięcia łuku  $U_l$  w funkcji mocy łuku  $P_l$



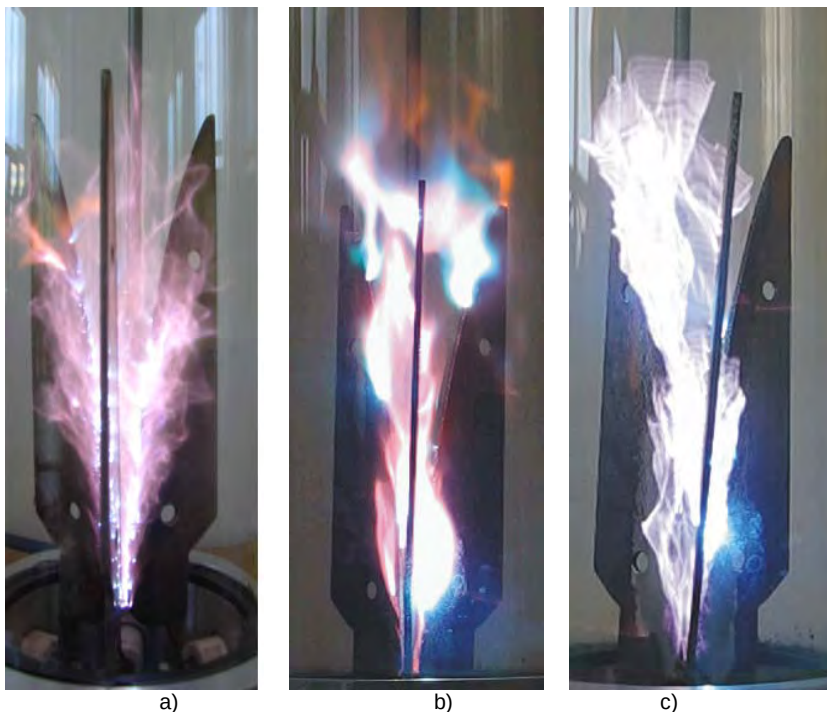
Rys. 6.13. Zależność mocy wyładowania  $P_l$  od wartości prądu łuku  $I_l$



Rys. 6.14. Zmiany rezystancji przestrzeni międzyelektrodowych  $R_l$  reaktora plazmowego w funkcji prądu wyładowania  $I_l$



Rys. 6.15. Wpływ częstotliwości napięcia zasilającego  $f$  elektrody roboczej reaktora plazmowego na moc wyładowania  $P_l$



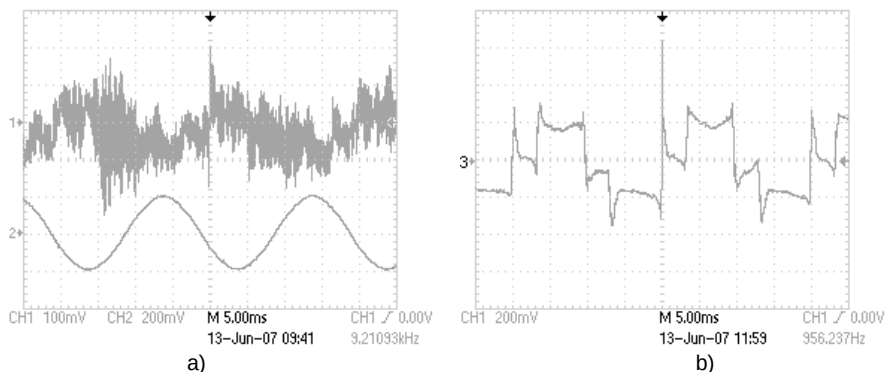
Rys. 6.16. Ślizgające się wyładowanie łukowe w reaktorze trójelektrowym przy zasilaniu z:  
a) transformatorów o rdzeniach z blachy transformatorowej ET-3,  
b) transformatorów z rdzeniami amorficznymi (METGLAS); c) z układu przekształtnikowego (gaz roboczy - argon, napięcie wyładowania  $U_i=250$  V, prąd  $I_i=2,2$  A, przepływ gazu  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ )

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

Przy zasilaniu reaktora plazmowego z układu przekształtnikowego, dodatkowo w przebiegach napięć pojawiają się wyższe harmoniczne wynikające z częstotliwości ich próbkowania, co, jak widać z rysunku 6.16c, wyraźnie wpływa na przebieg wyładowania. Wpływ częstotliwości próbkowania i układu zapłonowego widoczny jest także na oscylogramach prądów, napięć i mocy przedstawionych na rysunku 6.17.

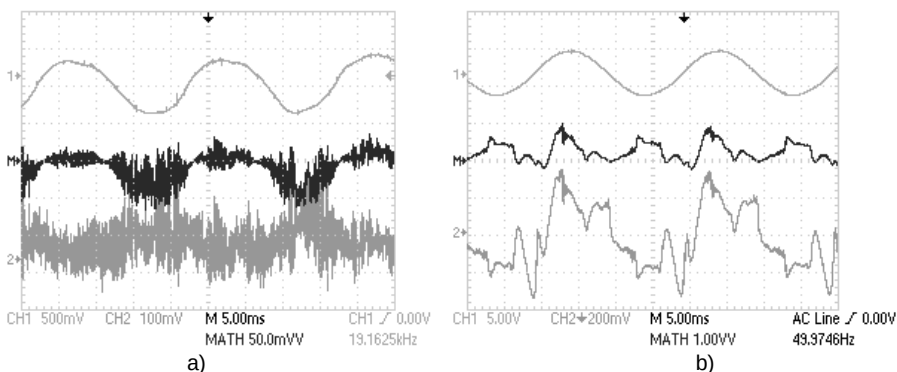
Zastosowane w konstrukcji transformatorów zasilających rdzenie amorficzne przenosiły częstotliwość  $20\text{kHz}$ , z jaką pracował elektroniczny układ zapłonowy oraz inne wyższe harmoniczne generowane przez łuk elektryczny. Harmoniczne te występowały w napięciach fazowych elektrod, natomiast prąd elektrod miał kształt sinusoidalny (Rys. 6.17a). Wyższe harmoniczne generowane przez układ zapłonowy nie występują w napięciach międzyelektrodowych (Rys. 6.17b). Stosując trans-

formatory z rdzeniami z blachy elektrotechnicznej, w układzie zasilania reaktora łukowego obserwuje się mniejszy udział wyższych harmonicznych w napięciach fazowych zasilających elektrody.



Rys. 6.17. Oscylogramy prądu i napięcia wyładowania w reaktorze plazmowym 1 – napięcie fazowe, 2 – prąd fazowy, 3 – napięcie przewodowe

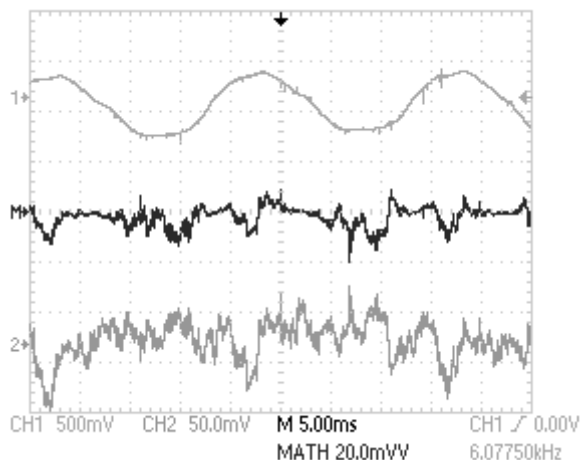
Dla porównania, na rysunku 6.18, przedstawiono oscylogramy napięć fazowych, prądu oraz mocy wyładowania dla obu rodzajów materiału rdzenia (amorficzny, blacha elektrotechniczna) transformatorów stosowanych w układzie zasilania. Zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych w układzie z rdzeniami amorficznymi jest możliwe przez zastosowanie układu zapłonowego pracującego przy częstotliwości technicznej 50 Hz. Przebieg napięcia fazowego w takim układzie oraz prądu i mocy wyładowania przedstawia rysunek 6.19.



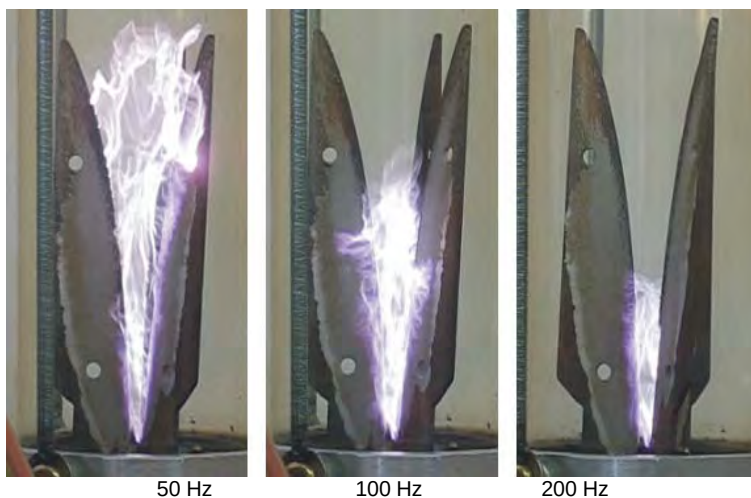
Rys. 6.18. Oscylogramy 1 – prądu fazowego, 2 – napięcia fazowego, M – mocy wyładowania przy zasilaniu reaktora plazmowego z transformatorów o rdzeniach: a) amorficznych b) z blachy transformatorowej



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



Rys. 6.19. Oscylogramy 1 – prądu fazowego, 2 – napięcia fazowego, M – mocy wyładowania przy zasilaniu reaktora plazmowego poprzez transformatory z rdzeniami amorficznymi i z układem zapłonowym o częstotliwości 50Hz



Rys. 6.20. Wpływ częstotliwości napięcia zasilającego elektrody robocze na charakter wyładowania. (napięcie wyładowania  $U_l=250$  V, prąd łuku  $I_l=2,2$  A, przepływ gazu  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ , gaz roboczy argon)

Generalnie, częstotliwość napięcia zasilającego elektrody robocze ma niewielki wpływ na wartość mocy wyładowania, jednakże największy dla wyładowania w azocie (Rys. 6.15). Zmiana częstotliwości napięcia zasilającego elektrody robocze reaktora plazmowego ma natomiast wpływ na sposób, w jaki rozwija się wyładowanie. Na rysunku 6.20 przedstawiono wyładowanie zachodzące przy 50 Hz, 100 Hz i 200 Hz w azocie.

Przy częstotliwości sieciowej wyładowanie rozwija się na całej długości elektrod roboczych. Wraz ze wzrostem częstotliwości zmniejsza się przestrzeń, jaką wypełnia wyładowanie i przy 200 Hz ogranicza się ona praktycznie do niewielkiego obszaru wokół elektrody zapłonowej. W badanym reaktorze, zasilanym z układu przekształtnikowego poprzez transformatory podwyższające napięcie, ze wzrostem częstotliwości napięcia zasilającego następuje zmniejszenie mocy wyładowania oraz ograniczenie objętości generowanej plazmy [10].

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

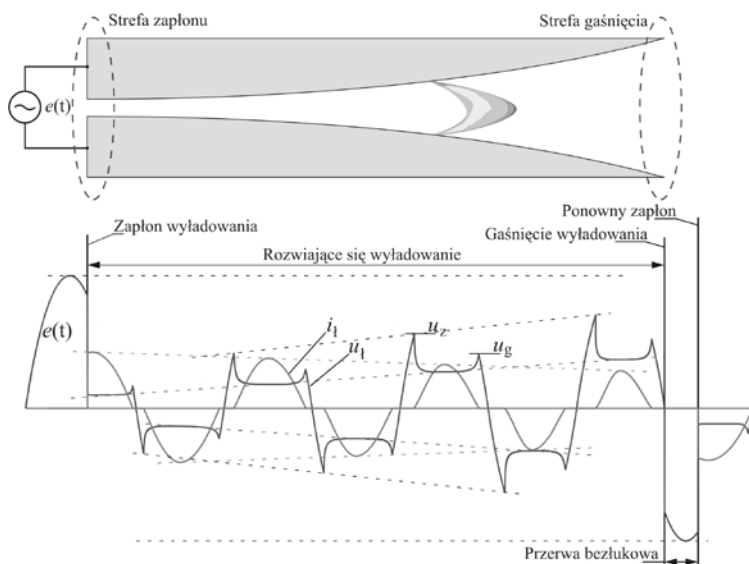
Zapłon wyładowania na elektrodach roboczych reaktora plazmowego inicjowany jest przeskokiem iskry elektrycznej pomiędzy elektrodą zapłonową a jedną z trzech elektrod roboczych. Pojedynczy kanał iskry elektrycznej jest rodmuchiwany gazem napływającym z dyszy do komory wyładowczej reaktora. W efekcie przebiecie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

Cykl pracy reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem zostanie prześledzony na przykładzie reaktora dwuelektrodowego (Rys. 6.21). Z chwilą zamknięcia się kanału iskry elektrycznej między elektrodami roboczymi, wzrasta moc dostarczana do wyładowania. Przy wzroście mocy źródła kanały iskrowe rozszerzają się w szerokie pasma i wyładowanie przechodzi w tzw. zagęszczone wyładowanie iskrowe. Przy dalszym wzroście mocy źródła wyładowanie przekształca się w łuk elektryczny. W łuku elektrycznym emisja elektronów z elektrod ma charakter termiczny, dlatego charakterystyczne dla łuku jest to, że im większy jest prąd wyładowania, tym mniejsze napięcie jest potrzebne do podtrzymania jego płonienia. Przy stosunkowo dużym wzroście prądu występuje niewielkie zmniejszenie napięcia, i w efekcie wzrasta moc wydzielana w łuku. Wzrost mocy łuku pociąga za sobą wzrost temperatury katody a więc i wzrost jej emisji.

Temperatura kolumny łuku elektrycznego zawiera się w granicach (4000 ÷ 7000) K i rośnie wraz z ciśnieniem gazu. W reaktorach plazmowych, ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, dąży się do osiągnięcia łuku długiego o

stosunkowo szerokiej kolumnie. Łuk ten musi być na tyle zimny, by nie topić materiału elektrod i elementów konstrukcyjnych reaktora. Równocześnie palący się w reaktorach łuk musi zapewniać odpowiednie parametry generowanej nim plazmy, aby poprawnie prowadzić reakcje plazmo-chemiczne. Takie wyładowanie łukowe można otrzymać przy stosunkowo wysokim napięciu i niewielkich wartościach prądu. Wytrzymałość przerwy międzyelektrodowej zależy od parametrów termodynamicznych gazu, w jakim zachodzi wyładowanie łukowe, a w szczególności od jego składu chemicznego, ciśnienia, temperatury, a w mniejszym stopniu, od jego prędkości w komorze wyładowczej.

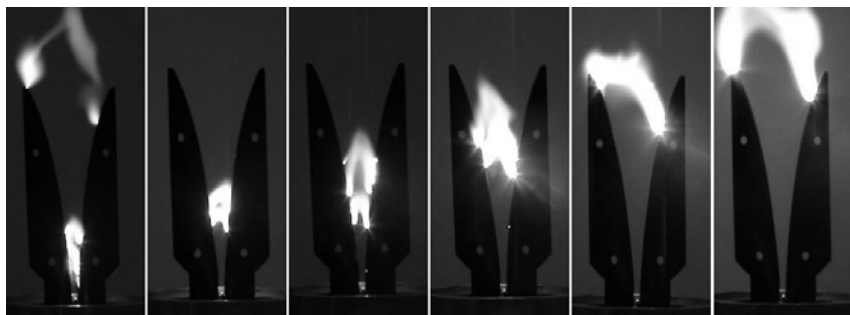
Ślizgający się łuk elektryczny, jako odbiornik energii elektrycznej, wraz z układem zasilania tworzą obwód o parametrach nieliniowych i niestacjonarnych. Na rysunku 6.21 przedstawiono teoretyczne przebiegi napięcia i prądu podczas cyklu pracy dwuelektrodowego reaktora plazmowego.



Rys. 6.21. Chwilowe przebiegi napięć i prądów dwuelektrodowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym:  $e(t)$  – napięcie źródła zasilania,  $u_l$  – napięcie łuku,  $i_l$  – prąd łuku,  $u_z$  – napięcie zapłonu wyładowania,  $u_g$  – napięcie gaśnięcia wyładowania

Odpowiadający przedstawionym przebiegom chwilowym rozwój ślizgającego się łuku w powietrzu (bez nadmuchu gazu roboczego) podczas cyklu pracy dwuelektrodowego reaktora plazmowego, od chwili zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych do chwili jego zgaszenia, przedstawiono na rysunku 6.22.

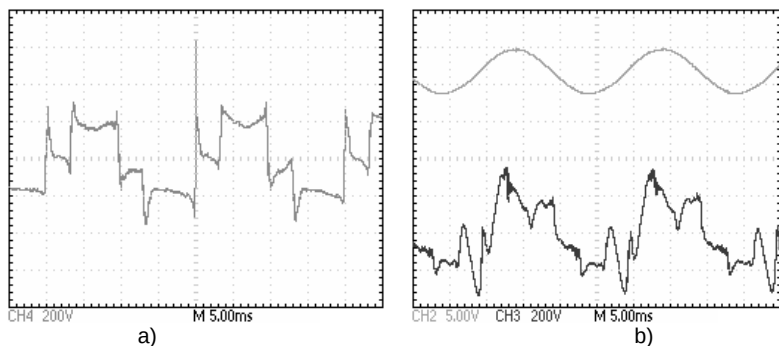
Z charakterystyk uzyskanych w trójelektrodowym reaktorze plazmowym, zasilanym z sinusoidalnego źródła napięcia, przedstawionych na rysunku 6.23, wynika, że prąd łuku jest praktycznie sinusoidalny natomiast silnemu odkształceniu ulega napięcie.



Rys. 6.22. Rozwój wyładowania łukowego przy jego naturalnym unoszeniu się w trakcie cyklu pracy dwuelektrodowego reaktora plazmowego [18]

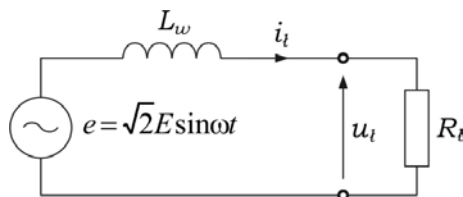
Czas trwania jednego cyklu pracy reaktora, od zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych do jego zgaśnięcia na krańcach elektrod, zależy od ich wymiarów i kształtu, prędkości przepływu gazu, jego rodzaju oraz temperatury i może wynosić od kilku do kilkunastu okresów napięcia zasilającego przy częstotliwości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

Przyjmując jednofazowy schemat zastępczy układu para elektrod reaktora łukowego – nieidealne sinusoidalne źródło zasilania o indukcyjności wewnętrznej  $L_w$ , można przeprowadzić uproszczone rozważania energetyczne, niezbędne do projektowania i budowy układów zasilania urządzeń wyładowczych ze ślizgającym się łukiem elektrycznym. Przed zapłonem wyładowań prąd nie płynie, napięcie na elektrodach jest równe napięciu źródła, a rezystancja przestrzeni międzyelektrodowej jest nieskończenie duża. Dla analizy mocy istotny jest stan po zapłonie, który nastąpi, gdy wartość chwilowa napięcia źródła przekroczy napięcie zapłonu wyładowań. Indukcyjność wewnętrzna źródła  $L_w$  jest stała, natomiast rezystancja łuku  $r_l(t)$  zmienia wartość w czasie półokresu napięcia zasilającego, a przebiegi prądu i napięcia na wyładowaniu odbiegają od sinusoidy. Aby ograniczyć prąd zwarcia, reaktancja źródła ma zwykle w układach zasilania urządzeń wyładowczych znaczną wartość i prąd elektrod jest znacznie mniej odkształcony niż napięcie (Rys. 6.23).



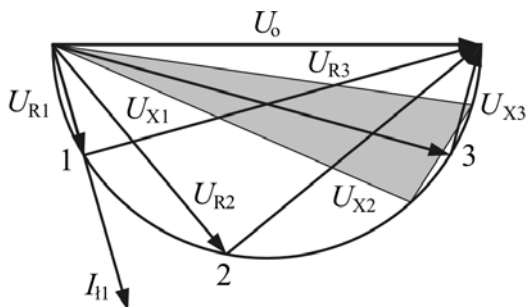
Rys. 6.23. Przebiegi prądu i napięcia pracującego reaktora plazmowego: a – przebiegi prądu i napięcia fazowego, b – napięcie międzyfazowe

Jeżeli przyjmiemy do rozważań pierwsze harmoniczne prądu i napięcia, to nieliniową rezystancję wyładowania łukowego możemy zastąpić wartością stałą  $R_l$ , a schemat zastępczy układu może być odwzorowany jak na rysunku 6.24.



Rys. 6.24. Schemat zastępczy układu reaktor łukowy - źródło do uproszczonych rozważań energetycznych:  $R_l$  – rezystancja łuku,  $L_w$  – indukcyjność źródła

Jeżeli prąd łuku jest ograniczany dławikami, jak to często ma w praktyce miejsce, to indukcyjność  $L_w$  na schemacie zastępczym jest sumą indukcyjności wewnętrznej układu zasilania i indukcyjności dławików. Rezystancja wyładowania w przepływającym gazie ma wartość kilkuset omów i jest miarą mocy czynnej  $P$ . Przerwy bezprądowe, występujące między kolejnymi cyklami, trwają nie dłużej niż  $\frac{1}{4}$  okresu napięcia źródła i ich wpływ na moc reaktora może być w rozważaniach pominięty. Z dotychczasowych badań i doświadczeń konstrukcyjnych [6, 7] wynika, że w układach zasilania reaktorów plazmowych bez układu zapłonowego, moc bierna przesunięcia  $Q$  jest około 10 razy większa od mocy czynnej łuku  $P_l$ , natomiast moc bierna odkształcenia  $D_l$  nie przekracza 30% mocy czynnej łuku, a więc stanowi tylko 3% mocy biernej przesunięcia. Pomijając zatem moc odkształcenia, można przeprowadzić przybliżoną analizę wpływu stosunku reaktancji źródła (transformatora)  $X_w$  do rezystancji zastępczej ślizgającego się łuku  $R_l$ , posługując się w tym celu wykresem fazorowym dla pierwszych harmonicznych napięć i prądu, przedstawionym na rysunku 6.25.



Rys. 6.25. Wykres fazorowy napięć i prądów reaktora łukowego dla trzech wartości reaktancji źródła

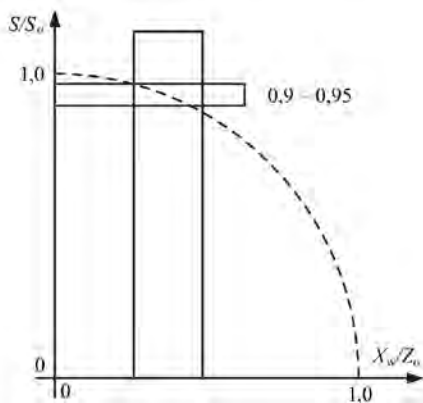
Napięcie na zaciskach reaktora w stanie jałowym  $U_0$ , jest równoważone napięciem na reaktancji wewnętrznej źródła  $U_x$  i napięciem między elektrodami reak-

tora  $U_R$ . Wykres wielkości z indeksem 1 opisuje reaktor bez elektrody zapłonowej. Wówczas, napięcie źródła musi mieć wartość wystarczającą do zapłonu a jednocześnie źródło musi mieć tak dużą reaktancję wewnętrzną, aby napięcie między elektrodami przy płonącym łuku wynosiło od  $(0,1 \div 0,2) U_0$ . Wykorzystanie mocy transformatora zasilającego reaktor wyniesie wówczas około 20%. Współczynnik mocy  $\lambda$ , który można uznać za współczynnik wykorzystania mocy źródła, wyniesie około 0,15, a sprawność energetyczna układu będzie bardzo niska. Wykres wielkości z indeksem 2 opisuje reaktor plazmowy, w którym średnia wartość rezystancji statycznej wyładowania jest równa reaktancji źródła zasilania ( $R_i = X_w$  - przypadek dopasowania odbiornika do źródła). Przy założeniu stałej reaktancji  $X_w$  i regulowanej rezystancji wyładowania łukowego  $R_i$ , np. poprzez odstęp elektrod, oraz przy zapłonie z osobnego źródła, dla stałego napięcia  $U_0$ , moc oddawana ze źródła do łuku byłaby największa. W praktyce taki przypadek nie jest realizowany, bowiem duża strata napięcia na reaktancji wewnętrznej obniża wykorzystanie mocy źródła i jego sprawność. Pożądany punkt pracy reaktora plazmowego przedstawia wykres wielkości z indeksem 3 i obszar zakreskowany wokół punktu 3 (Rys. 6.25).

Moc źródła zasilania jest ograniczona napięciem w stanie jałowym i dopuszczalnym prądem  $I_0$ . Parametry reaktora plazmowego i układu zasilania powinny być tak dobrane, aby ich współpraca odbywała się z maksymalną mocą i sprawnością i aby była stabilna. Moc wyładowania łukowego nie może być większa od mocy odniesienia wynikającej z iloczynu napięcia i prądu, według:  $S_0 = U_0 \cdot I_0 = S_{\max}$ , w którym:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R_i^2 + X_w^2}}. \quad (6.1)$$

Dobierając odpowiednio reaktancję źródła zasilania można dowolnie przybliżyć moc czynną do mocy maksymalnej, jednak aby zapewnić dobrą stabilność pracy i małe przerwy bezprądowe, reaktancja nie powinna być mniejsza od 30% impedancji obwodu (rys. 6.26), co zapewnia wysoką sprawność i wykorzystanie mocy źródła do 95%.



Rys. 6.26. Wpływ reaktancji źródła zasilania na wykorzystanie jego mocy, gdzie:  $S=UI$ ,  $Z_0 = UII$  – impedancja obciążenia

Moc bierna odkształcenia w ślizgającym się wyładowaniu łukowym jest znacznie mniejsza od mocy biernej przesunięcia występującej w układzie zasilania i jej wpływ na straty mocy, wymiary układu i moc pobieraną z sieci jest pomijalny.

Z przeprowadzonych w pracy [7] rozważań i analiz wynika, że zaproponowany do zasilania reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym układ zintegrowany, dzięki m. in. minimalizacji mocy biernej przesunięcia, ma najwyższą sprawność, spośród stosowanych w praktyce układów, charakteryzując się przy tym prostą budową, dużą niezawodnością i niskimi kosztami eksploatacji.

## **6.5. Przegląd wybranych rozwiązań układów zasilania reaktorów nietermicznej plazmy**

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

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

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

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

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

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

- napięcie zasilania,
- rodzaj prądu zasilania,
- sposób realizacji zapłonu wyładowania,
- moc odbiornika i możliwa do realizacji moc układu zasilania,
- możliwość regulacji wartości prądu i zachowania jego ciągłości w całym obszarze pracy reaktora plazmowego,

- zdolność źródła zasilania do pracy w układach automatycznego sterowania i regulacji oraz dostosowania parametrów do różnych gazów roboczych oraz ich mieszanin,
- poprawna współpraca z siecią zasilającą,
- wysoka sprawność,
- prostota i bezpieczeństwo obsługi,
- niskie koszty budowy i eksploatacji.

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

W ostatnim czasie coraz większe zastosowania w procesach generacji nietermicznej plazmy znajdują układy z energią impulsową. Dzięki doskonaleniu technologii obwodów półprzewodnikowych i scalonych, a także właściwości materiałów magnetycznych, wykorzystanie energii impulsowej do zasilania reaktorów plazmowych wzrasta.

#### **6.5.1. Układy transformatorowe**

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

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

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

Wśród transformatorowych układów zasilania omówione zostaną układy do zasilania reaktorów plazmy ślizgającego się łuku - zintegrowany i z transformatorem pięciokolumnowym. Rozwiązania takich układów zostały opatentowane [16], i stały się podstawą do budowy kilkunastu zasilaczy, pracujących obecnie w laboratoriach w Polsce, m.in. w Instytucie Chemii Przemysłowej w Warszawie, w Przemysłowym Instytucie Elektroniki i w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej, oraz we Francji, w Uniwersytecie w Orleanie.

Modyfikacją układu zintegrowanego, jest zastosowanie transformatora pięcio-



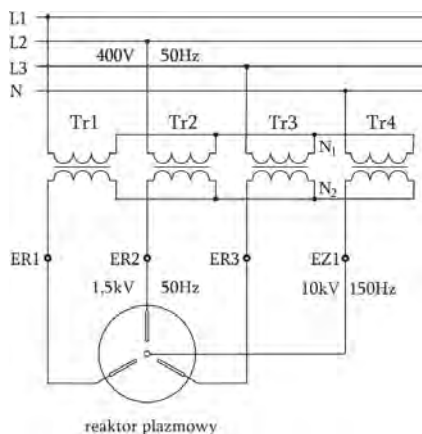
kolumnowego w układzie zasilania reaktora plazmowego. Taki zasilacz został zbudowany w ramach realizacji rozprawy doktorskiej [10] i poddany badaniom, które potwierdziły jego dobre właściwości do zasilania łukowych reaktorów plazmowych.

### 6.5.2. Zintegrowany układ zasilania

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

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

Zjawisko nieliniowości charakterystyki magnesowania jest nieodłączną cechą obwodów z rdzeniem magnetycznym i w klasycznych transformatorach energetycznych staramy się minimalizować jego wpływ na charakterystyki transformatora. W układzie zintegrowanym wykorzystano wyższe harmoniczne napięć indukowanych w rdzeniach transformatorów roboczych do zapłonu wyładowania. Przykładowe rozwiązanie układu zintegrowanego prezentuje rys. 6.27.

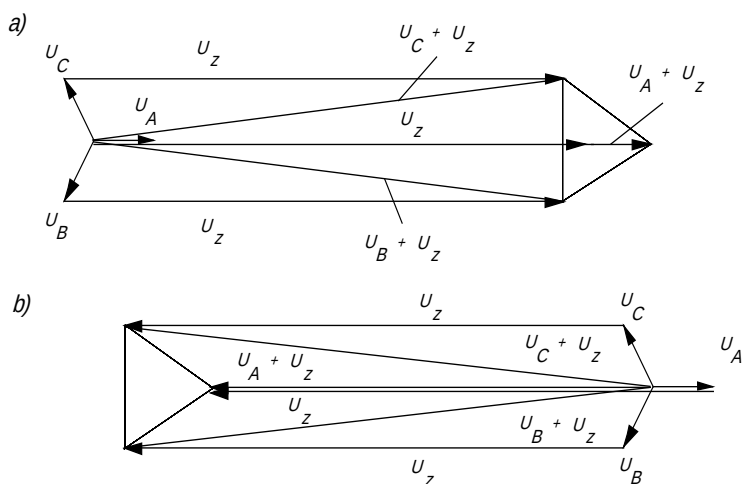


Rys. 6.27. Zintegrowany układ zasilania reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

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

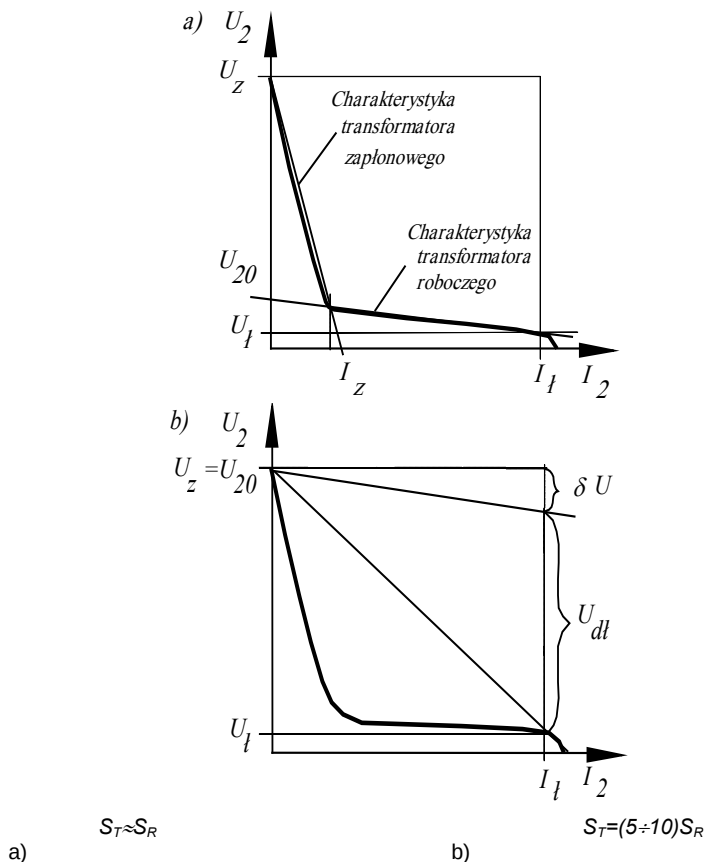
Zarówno uzwojenia pierwotne jak i wtórne transformatorów są połączone w gwiazdę, przy czym zaciski uzwojeń wtórnych są dołączone do elektrod reaktora plazmowego. Czwarty transformator, zwany zapłonowym, jest włączony na napięcie, jakie indukuje się pomiędzy punktem neutralnym trójfazowej sieci zasilającej i punktem gwiazdowym uzwojeń pierwotnych transformatorów roboczych (Rys. 6.27). Napięcie na wyjściu transformatora zapłonowego ma wartość wystarczająca do zjonizowania przestrzeni międzyelektrodowej, umożliwiając zapłon wyładowania między elektrodami głównymi reaktora. Po zapłonie wyładowanie jest przejmowane i podtrzymywane przez transformatory robocze, które są zaprojektowane i zbudowane na napięcie kilkanaście razy niższe od napięcia zapłonu. Trzy razy większa częstotliwość napięcia zapłonowego, w stosunku do napięcia pracy, poprawia skuteczność zapłonu i skracza przerwy bezprądowe. Istotną cechą układu zintegrowanego jest możliwość kształtowania dopasowania jego charakterystyki zewnętrznej do potrzeb reaktora plazmowego.

Uzwojenia wtórne transformatora zapłonowego można tak połączyć względem uzwojeń wtórnych transformatorów roboczych, że amplitudy ich napięć będą się na elektrodach reaktora plazmowego dodawać lub odejmować. Odpowiadające obu tym połączeniom wykresy fazorowe dla pierwszej harmonicznej napięcia roboczego (50Hz) i pierwszej harmonicznej napięcia zapłonu 150Hz w stanie jałowym przedstawia rysunek 6.28. Połączenie uzwojeń, któremu odpowiada wykres z rysunku 6.28 a daje wyższe napięcie zapłonu i takie powinno być realizowane w praktyce.



Rys. 6.28. Wykres fazorowy napięć na zaciskach elektrod reaktora zasilanego układem zintegrowanym w stanie jałowym, a) przy połączeniu zgodnym uzwojeń transformatora zapłonowego względem uzwojeń transformatora roboczego, b) przy połączeniu przeciwnym

Przykładową charakterystykę prądowo-napięciową reaktora plazmowego, zasilanego z układu zintegrowanego (napięcie pary elektrod, w funkcji prądu elektrod  $U=f(I)$ ), przedstawiono na rysunku 6.29 a. Dla porównania przedstawiono na tym samym rysunku charakterystykę zewnętrzną reaktora plazmowego, zasilanego z transformatora z dławikami (rys.6.29 b).



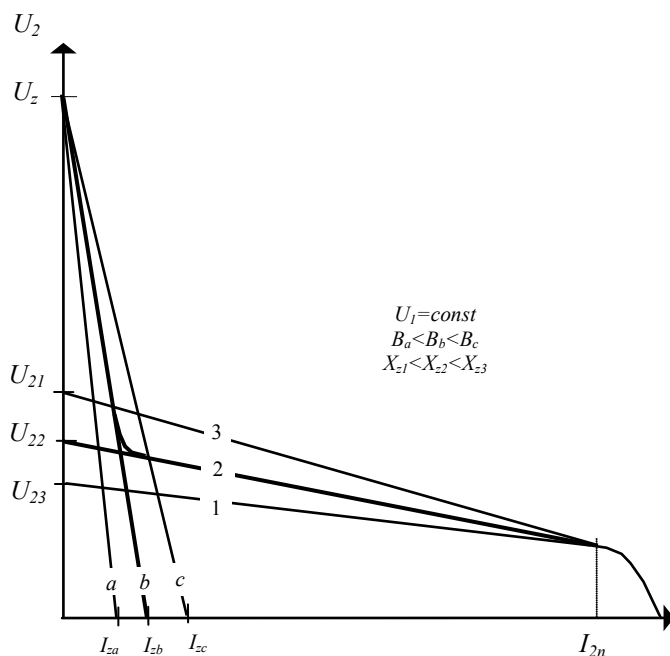
Rys. 6.29. Charakterystyka zewnętrzna reaktora plazmowego: a) zasilanego z układu zintegrowanego, b) zasilanego z transformatora z dławikami;  $\delta U$  – strata napięcia w transformatorze,  $U_{dl}$  – spadek napięcia na dławiku ograniczającym prąd elektrod

Moc pozorna transformatora  $S_T$ , w układzie z dławikami ograniczającymi prąd (Rys. 6.29 b), jest około 5÷10 razy większa od mocy reaktora plazmowego,  $S_R$ . Natomiast w układzie zintegrowanym moc transformatora roboczego jest w przybliżeniu równa mocy reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym (Rys. 6.29 a). Tak duże zmniejszenie mocy i obniżenie napięcia transformatora roboczego w układzie zintegrowanym przynosi mniejsze zużycie materiałów, obniża koszty budowy oraz podwyższa sprawność energetyczną transformatora.

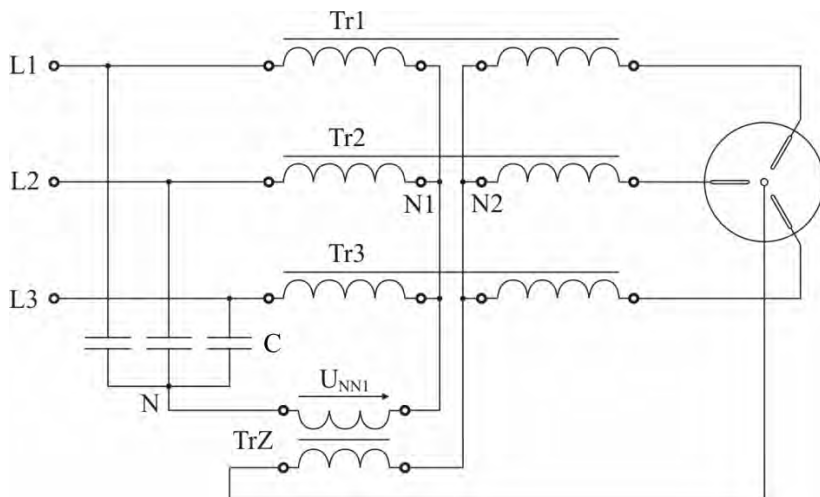
Główną cechą układu zintegrowanego jest możliwość dopasowania jego charakterystyki prądowo-napięciowej do wymagań reaktora plazmowego. Ideę metody kształtowania charakterystyki zewnętrznej układu zasilania reaktora do plazmowej obróbki gazów, przedstawia rys. 6.30. Dobierając na etapie projektowania poziom indukcji w rdzeniach transformatorów zasilacza oraz wartość reaktancji rozproszenia uzwojeń, można wpływać zarówno na nachylenie charakterystyki zewnętrznej obwodu zasilającego elektrody robocze, jak i transformatora zapłonowego.

Przedstawiona idea układu zintegrowanego może być wykorzystana także w układach bez dostępnego punktu neutralnego sieci zasilającej (sieć trójprzewodowa), wówczas rolę punktu neutralnego odgrywa sztuczny punkt gwiazdowy, który może być zrealizowany z trzech połączonych w gwiazdę kondensatorów (rys. 6.31). W układzie z rysunku 6.31 kondensatory służą do kompensacji mocy biernej układu a także zwiększają amplitudę napięcia zapłonu.

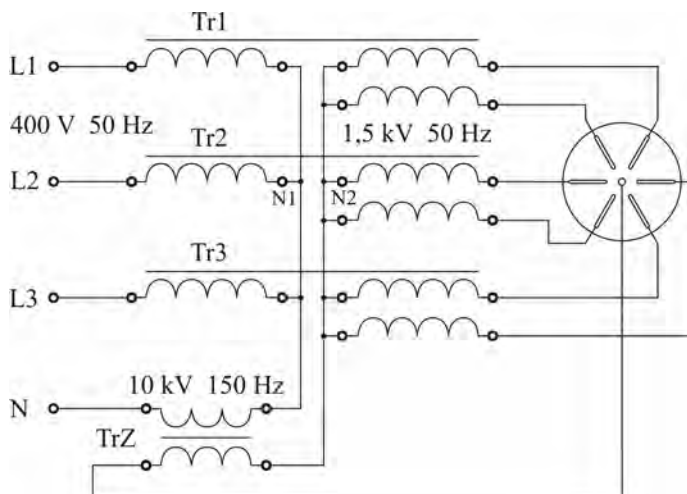
Inne rozwiązania układu zintegrowanego do zasilania reaktorów sześciu i dziewięcioelektrodowych przedstawiają rysunki 6.32 i 6.33. Transformatory robocze w układzie z rysunku 6.32 mają dzielone uzwojenia wtórne. W ten sposób układ może służyć do zasilania reaktora 6-elektrodowego lub dwóch reaktorów 3-elektrodowych pracujących szeregowo dla przepływu gazu roboczego.



Rys. 6.30. Metoda wyznaczania charakterystyki prądowo-napięciowej  $U_2=f(I_2)$  zintegrowanego układu zasilania; 1, 2 i 3 – charakterystyki transformatorów roboczych dla różnych wartości reaktancji zwarcia; a, b i c- charakterystyki transformatora zapłonowego dla trzech wartości indukcji w rdzeniach transformatorów roboczych (na rysunku nie zachowano proporcji między prądem elektrod roboczych a prądem transformatora zapłonowego)

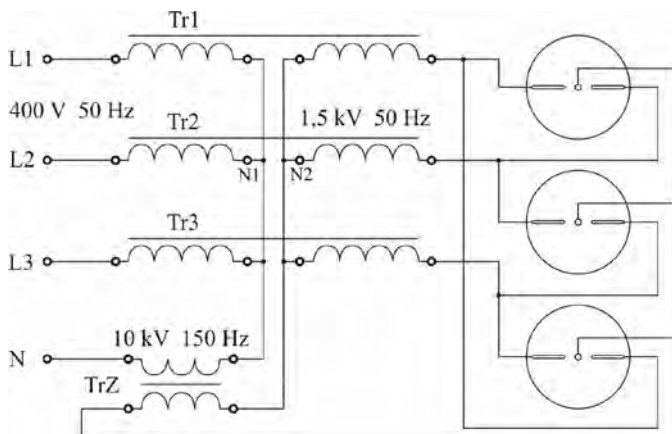


Rys. 6.31. Zintegrowany układ zasilania ze sztucznym punktem neutralnym utworzonym z kondensatorów



Rys. 6.32. Układ zintegrowany zasilający reaktor sześcieelektrodowy

Układ zasilania z rys. 6.33, dzięki trójstopniowemu połączeniu elektrod roboczych (dwie z trzech elektrod roboczych i jedna elektroda zapłonowa w każdym stopniu), pozwala na zwiększenie przestrzeni objętej wyładowaniem i może mieć zastosowanie do utylizacji gazów wylotowych przy dużych ich przepływach tak, aby przedłużyć czas przebywania zanieczyszczonego gazu w przestrzeni objętej plazmą.



Rys. 6.33. Układ zintegrowany zasilający reaktor dziewięcioelektrodowy

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

Do zasilania łukowych reaktorów plazmowych różnych typów, a w szczególności wieloelektrodowych reaktorów plazmy ślizgającego się łuku elektrycznego z wydzielonymi układami zapłonowymi, mogą być stosowane transformatory o rdzeniach pięciokolumnowych [10, 12, 14, 18]. Podobnie jak przedstawione w poprzednim rozdziale układy zintegrowane, transformator pięciokolumnowy musi realizować podstawowe funkcje zasilacza, do których należą:

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

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

Analizując układ zasilania z rdzeniem pięciokolumnowym (rys. 6.34), można w nim wyróżnić dwa obwody wtórne:

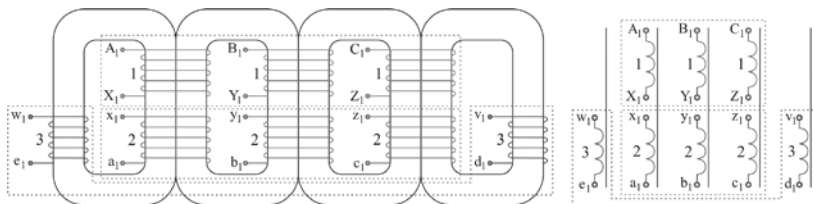
- obwód zasilający elektrody robocze reaktora plazmowego,
- obwód zapłonu wyładowania,

które pracują w zasadzie niezależnie.

Moc do reaktora plazmowego dostarczana jest przez obwód uzwojeń wtórnych, umieszczonych na wewnętrznych kolumnach fazowych, który zasila elektrody

robocze reaktora plazmowego napięciem o wartości wymaganej dla prowadzonego procesu plazmowego.

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

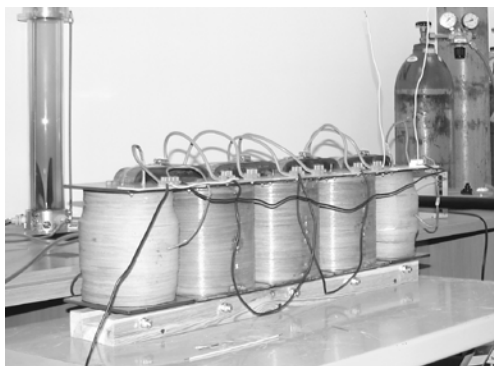


Rys. 6.34. Uzwojenia kolumn transformatora pięciokolumnowego i jego schemat elektryczny:  
(1) - obwód pierwotny, (2) - obwód wtórny (3) - obwód zapłonowy

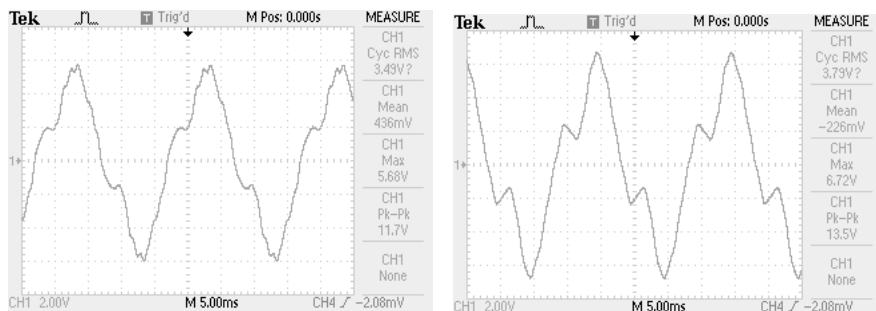
Uzwojenia kolumn zewnętrznych (zapłonowe) mogą pracować jako niezależne lub mogą być łączone szeregowo bądź równolegle. Łączenie szeregowe stosujemy w celu zwiększenia wartości napięcia zapłonowego, równoległe, gdy zachodzi konieczność zwiększenia prądu iskry zapłonowej, a praca niezależna może mieć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

W celu zbadania właściwości układów zasilania bazujących na rdzeniach pięciokolumnowych zbudowano zasilacz (rys. 6.35) i zdjęto jego charakterystyki w różnych stanach pracy [10]. Transformator został zbudowany z rdzeni zwijanych, wykonanych z blachy transformatorowej ET-3. Zasadniczym zagadnieniem przy projektowaniu układów zasilania z transformatorami 5-kolumnowymi, jest kształtowanie charakterystyki zewnętrznej uzwojeń kolumn zewnętrznych, pełniących funkcję obwodu zapłonowego. Napięcie indukowane w tych uzwojeniach musi mieć wartość niezbędną do zapłonu wyładowania, a jednocześnie ich charakterystyka prądowo-napięciowa musi być podatna (miękkka) tak, aby prąd w uzwojeniu zapłonowym był ograniczany do dowolnie niskiej wartości po przejęciu wyładowania przez elektrody robocze tak, jak to dzieje się w układzie zintegrowanym.

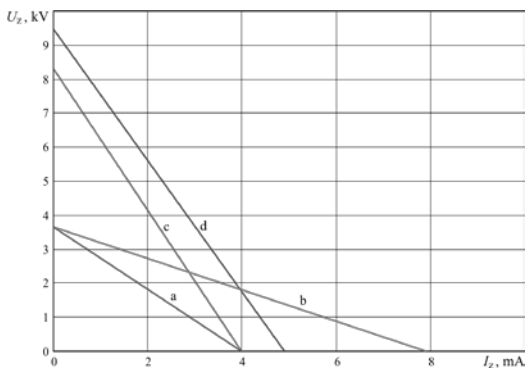
Na rysunku 6.36 przedstawiono oscylogramy napięć indukowanych w zewnętrznych kolumnach transformatora pięciokolumnowego, a na rysunku 6.37 charakterystyki prądowo- napięciowe uzwojeń kolumn zewnętrznych, dla różnych połączeń uzwojeń obu kolumn i uzwojenia fazowego. Niezależnie od sposobu połączenia uzwojeń zapłonowych uzyskane charakterystyki są bardzo miękkie. Napięcie stanu jałowego wynosi od 3,7 kV do 9,5 kV a prąd zwarcia od 4 mA do 8 mA. Oznacza to, że z chwilą wystąpienia wyładowania na elektrodzie zapłonowej reaktora plazmowego, napięcie obniży się do napięcia elektrod roboczych (0,2÷1,2 kV), by ponownie wzrosnąć do wartości stanu jałowego w kolejnym cyklu pracy reaktora.



Rys. 6.35. Widok zasilacza reaktora plazmowego z rdzeniem 5-kolumnowym



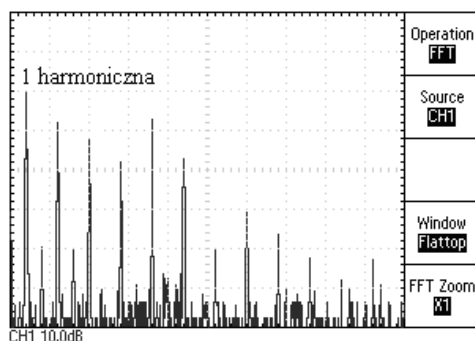
Rys. 6.36. Przebiegi napięć zmierzonych na uzwojeniach kolumn zewnętrznych transformatora 5-kolumnowego w stanie jałowym



Rys. 6.37. Charakterystyki zewnętrzne obwodu zapłonowego zasilacza dla różnych połączeń uzwojeń: (a) – jednego uzwojenia kolumny zewnętrznej, (b) – równoległego połączenia uzwojeń kolumn zewnętrznych, (c) – szeregowego połączenia uzwojeń kolumn zewnętrznych, (d) – szeregowego połączenia uzwojeń kolumn zewnętrznych i uzwojenia fazowego



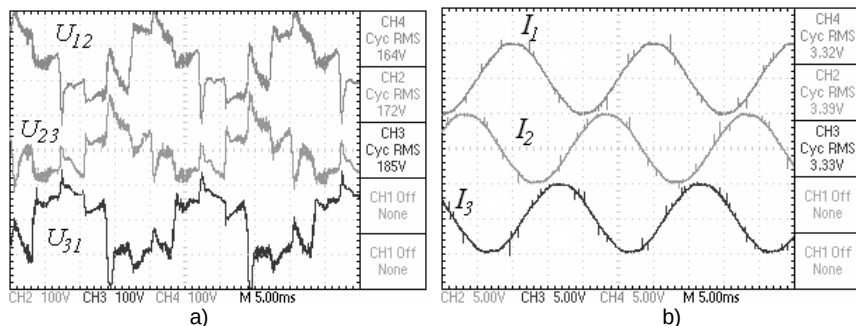
Mimo, że napięcia zapłonowe są znacznie odkształcone wyższymi nieparzystymi harmonicznymi, a w szczególności 3, 5, 7, 9 i 11 (rys. 6.38), to nie wpływa to negatywnie na zapłon wyładowania w reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.



Rys. 6.38. Spektrum wyższych harmonicznnych w napięciu uzwojenia kolumny zewnętrznej

Wartość skuteczna odkształconego napięcia indukowanego w kolumnie zewnętrznej wynosi 730 V, i jest poniżej wymaganej do zjonizowania przestrzeni międzyelektrodowej, ale chwilowe wartości maksymalne tego napięcia osiągają nawet 2 kV, co wystarcza do zjonizowania niewielkich przerw międzyelektrodowych występujących w strefie zapłonu reaktora plazmowego.

Na rysunku 6.39 przedstawiono przebiegi napięć i prądów zasilacza z rdzeniem 5-kolumnowym, obciążonego reaktorem plazmowym. Napięcia fazowe strony wtórnej zasilacza, są odkształcone od sinusoidy (rys. 6.39 a), natomiast prąd strony wtórnej wszystkich faz zasilacza zachowuje przebieg sinusoidalny (rys. 6.39 b).



Rys. 6.39. Przebiegi napięć fazowych (a) i prądów fazowych (b) strony wtórnej zasilacza przy obciążeniu reaktorem plazmowym

W oscylogramach prądu nie obserwuje się przerw bezprądowych w okolicach przejścia prądu przez zero, charakterystycznych dla łuków intensywnie chłodzonych, oraz nie występuje przesunięcie fazowe między prądem a napięciem. Wskazuje to na rezystancyjny charakter odbiornika, jakim jest trójfazowy reaktor plazmowy ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Za korzystny należy uznać

fakt, że zwarcie uzwojeń kolumn zewnętrznych zasilacza nie wpływa na wartości napięć zasilających elektrody robocze reaktora plazmowego.

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

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

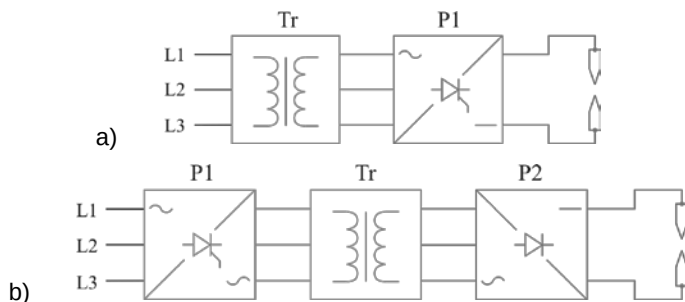
Wyładowanie iskrowe w układzie zapłonowym zachodzi wielokrotnie w czasie jednego cyklu pracy reaktora, co poprawia warunki konieczne do zapłonu wyładowania na elektrodach roboczych. Można zatem stwierdzić, że układy transformatorowe na rdzeniach pięciokolumnowych stanowią dobre źródła zasilania dla reaktorów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

#### 6.5.4. Układy przekształtnikowe

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

Do zasilania łukowych reaktorów plazmowych stosuje się dwie podstawowe konstrukcje [19].

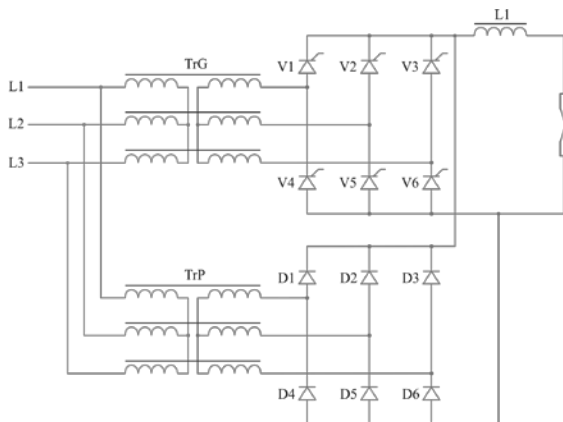
- z mostkiem sterowanym po stronie wtórnej transformatora dopasowującego (rys. 6.40),
- ze sterownikiem prądu przemiennego po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego (rys. 6.40).



Rys. 6.40 Podstawowe konstrukcje półprzewodnikowych układów zasilania reaktorów plazmy łukowej; a – układ z mostkiem sterowanym po stronie wtórnej transformatora, b – układ ze sterownikiem prądu przemiennego po stronie pierwotnej transformatora

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

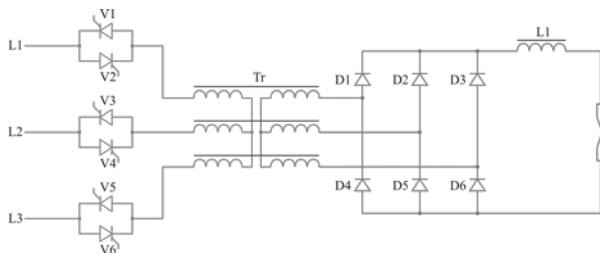
Układy z mostkiem sterowanym po stronie wtórnej transformatora znalazły zastosowanie w przemyśle elektrotermicznym do zasilania pieców łukowych i plazmowo-łukowych. Przykładowe rozwiązanie takiej konstrukcji przedstawiono na rysunku 6.41.



Rys. 6.41 Układ z mostkiem tyrystorowym i dodatkowym źródłem napięcia

Jest to układ złożony z dwóch transformatorów, w którym transformator główny zasila tyrystorowy mostek sześciopulsowy, będący elementem sterującym wartością prądu wyładowania łukowego. Dla ograniczenia indukcyjności w obwodzie z wyładowaniem, stosuje się dodatkowe źródło napięcia w postaci niesterowalnego sześciopulsowego mostka diodowego. Mostek ten zasilany jest z dodatkowego transformatora pomocniczego o małej mocy i tak dobranej reaktancji rozproszenia, by zapewnić intensywne opadanie charakterystyki zewnętrznej. Gdy prowadzony proces technologiczny wymaga wygładzonego prądu wyładowania łukowego, dodatkowo do obwodu wprowadza się dławik, jak to przedstawiono na rysunku 6.41

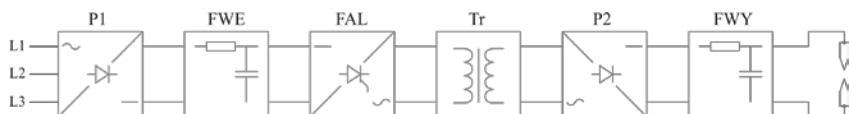
Układ zasilania reaktora plazmy łukowej, w którym sterowanie procesem plazmowym i kształtowanie charakterystyki zewnętrznej odbywa się po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego przedstawia rysunek 6.42



Rys. 6.42 Układ ze sterownikiem tyrystorowym po pierwotnej stronie transformatora

W tego typu układach, najczęściej we wszystkich trzech fazach, po stronie pierwotnej transformatora umieszczone są sterowniki tyrystorowe, zaś po stronie wtórnej znajduje się sześciopulsowy mostek diodowy i dławik zapewniający ciągłość prądu i jego wygładzenie. W celu zapewnienia minimalnego prądu wyładowania, w obwód po stronie pierwotnej, włącza się równolegle do sterowników dodatkowe dławiki a czasem stosuje się wielostopniowe połączenia tego typu, ograniczając w ten sposób pulsacje prądu wyładowania. Do podstawowych wad omówionych układów półprzewodnikowych zaliczyć należy przede wszystkim duże rozmiary, co istotnie ogranicza liczbę możliwych zastosowań. Wady tej pozbawione są półprzewodnikowe układy zasilania odbiorników łukowych z pośredniczącym obwodem podwyższonej częstotliwości. Rozwiązanie takie pozwala również na dokładniejszą regulację prądu wyładowania i polepsza dynamikę układu zasilania.

Wprowadzenie obwodu o podwyższonej częstotliwości umożliwia, przede wszystkim, zmniejszenie masy i objętości elementów indukcyjnych, tj. transformatora dopasowującego i dławika w obwodzie z wyładowaniem. Zwiększa się również sprawność urządzenia ze względu na mniejsze straty w miedzi transformatora. Schemat blokowy takiego układu przedstawia rysunek 6.43

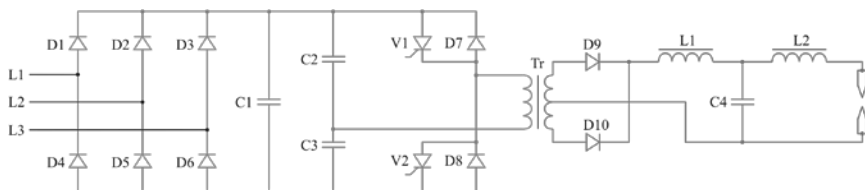


Rys. 6.43 Schemat blokowy układu z pośredniczącym obwodem podwyższonej częstotliwości; P1 – prostownik wejściowy, FWE – filtr wejściowy, FAL – falownik, Tr – transformator,

P2 – prostownik wyjściowy, FWY – filtr wyjściowy

Główne elementy układu to: prostownik, transformator podwyższający i falownik dający na wyjściu napięcie przemienne o podwyższonej częstotliwości. W układach z falownikami stosuje się częstotliwości w granicach od 500 Hz do 20 kHz. Uzyskane z falownika napięcie, jest transformowane do wymaganej wartości i następnie kolejny raz prostowane.

Na rysunku 6.44 przedstawiono obwód główny falownika szeregowego z diodami zwrotnymi, jaki znajduje zastosowanie w spawarkach do spawania ręcznego elektrodą otuloną i łukiem krytym.

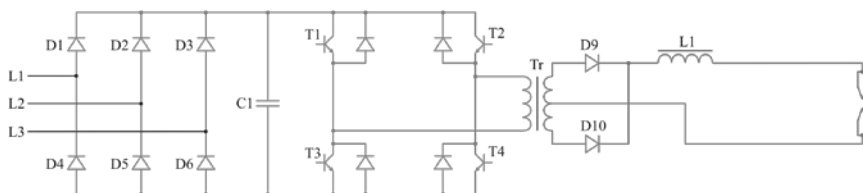


Rys. 6.44. Schemat obwodu głównego zasilacza w układzie falownika prądu z diodami zwrotnymi

Zaletą układu z rys. 6.44, 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 6.45. Napięcie wyjściowe tego falownika w niewielkim stopniu zależy od obciążenia, co jest szczególnie korzystne przy pracy reaktorów plazmowych z różnymi gazami roboczymi i przy różnej ich wydajności, w zależności od prowadzonego procesu technologicznego. Ponadto, zaletą układu jest lepsze wykorzystanie transformatora, w porównaniu z innymi układami półprzewodnikowymi, gdyż przenosi on głównie moc czynną. Gdy zawory energoelektroniczne układu wykonane są z tranzystorów, do sterowania i regulacji wykorzystuje się komparatory oraz regulatory prądu typu PI, co czyni układ mało skomplikowanym i niezawodnym.



Rys. 6.45. Układ zasilania z falownikiem o komutacji fazowej

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

## 6.6. Podsumowanie

W układach zasilania łukowych reaktorów nietermicznej plazmy, wykorzystuje się transformatory i układy przekształtnikowe. Układy transformatorowe o odpowiednio ukształtowanej charakterystyce zewnętrznej (reaktancji zwarcia), spełniają wszystkie wymagania urządzeń wyladowczych. Zapewniają zapłon wyladowań, ich podtrzymanie po zapłonie i ograniczenie prądu elektrod, a jako zasilacze reaktorów z wyladowaniami barierowymi kompensują składową pojemnościową prądu reaktora, poprawiając współpracę reaktora plazmowego z siecią zasilającą. W układzie zintegrowanym zapłon wyladowania realizowany jest przez trzecią harmoniczną (150 Hz) napięcia, indukowaną na skutek nieliniowości transformatorów roboczych, zaś przenoszenie mocy odbywa się przez pierwszą harmoniczną głównego strumienia magnetycznego transformatorów roboczych. Dzięki integracji funkcji zapłonu, podtrzymania wyladowania i ograniczenia prądu elektrod w jednym urządzeniu, transformatory robocze mogą być projektowane na kilka- do kilkunastokrotnie niższe napięcia pracy (moce znamionowe) niż stosowane dotychczas. Takie rozwiązanie zapewnia stabilną pracę reaktora plazmowego, krótkie przerwy bezprądowe,

pozwała zmniejszyć liczbę elementów stosowanych w tradycyjnych zasilaczach transformatorowych, a tym samym ma niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

Układy przekształtnikowe, stosowane powszechnie w celach napędowych, odpowiednio zaprojektowane jako zasilacze urządzeń wyładowczych mają wiele zalet i właściwości nieosiągalnych w zasilaczach transformatorowych. Główną zaletą takich zasilaczy jest możliwość regulacji napięć, prądów i mocy w szerokim zakresie, niezbędnym dla poprawnej pracy reaktora plazmowego. Obecnie, układy zasilania bazujące na tranzystorach IGBT, budowane są na małe i średnie moce, rzędu kilkuset kilowatów i częstotliwości do 20kHz, zaś układy bazujące na transformatorach MOSFET, mają moce rzędu kilku kilowatów i częstotliwości przełączania do kilkuset kiloherców [8]. Takie wartości mocy są wystarczające z punktu widzenia realizacji zasilaczy dla reaktorów nietermicznej plazmy o dobrych właściwościach regulacyjnych. Budowany w Laboratorium Technologii Plazmowych Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej w ramach projektu badawczego własnego MniSzW Nr N R01 0012 04, zasilacz energoelektroniczny AC/DC/AC w układzie otwartym oraz wieloelektrodowy reaktor plazmowy ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym o zmiennej, regulowanej geometrii elektrod, pozwoli na zbadanie właściwości takich systemów oraz dobór parametrów reaktorów plazmowych i ich zasilaczy dostosowanych do potrzeb procesów plazmochemicznych.

## **6.7.Literatura**

- [1] Radary B., Fulcheri L., Bakken J.A., Flamant G., Fabry F., "Influence of the electromagnetic forces on momentum and heat transfer in a 3-phase plasma reactor" Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol 19, 1, March 99, Plenum Press.
- [2] Matsuura T., Taniguchi K., Watanabe T., A New Type of Arc Plasma Reactor with Twelve-Phase Alternating Current Discharge for Synthesis of Carbon Nanotubes, Proceedings of 17th International Symposium on Plasma Chemistry, Toronto, Canada, August 7-12, 2005
- [3] Czernichowski, A., Janowski, T., Stryczewska, H.D., Performances of the Supplying Systems for Plasma Reactors, Contributed Papers of 4th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Bratislava, HAKONE IV, 1993
- [4] 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)
- [5] Stryczewska H. D.: Analiza zintegrowanych zasilaczy elektromagnetycznych w urządzeniach wyładowczych. Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej, ELEKTRYKA, 1996, ss. 132
- [6] Stryczewska H. D.: New supply system of the non-thermal plasma reactor with gliding arc. Archives of Electrical Engineering, No 4, 1997, pp. 379-399
- [7] Stryczewska H. D., Elektromagnetyczny układ zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, Politechnika Lubelska, seria Elektryka, Wydawnictwa Uczelniane, s. 146, 1998

- [8] Janowski T., Stryczewska H. D., Power Supply Systems of Ozone Generators with Magnetic Frequency Multipliers, *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, Vol. 9, no 2, July 31, 2006, pp. 128-133
- [9] Komarzyniec G., Diatczyk J., Stryczewska H. D., Arc Plasma Reactor Power system with 5-Limb Transformer, *Journal of AOTs*, vol. 9, No 2, 2006
- [10] G. Komarzyniec, Analiza pracy transformatora pięciokolumnowego w układzie zasilania łukowego reaktora plazmowego, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Lubelska, 2008
- [11] Stryczewska H. D., Janowski T., Komarzyniec G., Diatczyk J., Multi-stage Gliding Arc Reactors for Environmental Applications, *International COE Forum on Plasma Science and Technology*, Nagoya, Japan, 5-7 April 2004
- [12] Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Diatczyk J., 5-limb Transformer as a Power System of Arc Plasma Reactors, *International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5*, Nałęczów – Poland, 2005
- [13] Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Janowski T., Five Limb Transformer as a Power System of Arc Discharge Reactor, *3rd Polish-Japanese Hakone Group Symposium on Non-Thermal Plasma Processing of Water and Air*, Saga, Japan, September 4 – 8, 2006
- [14] Diatczyk J., Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Warunki generacji nietermicznej plazmy w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej – Nauki Techniczne – Elektryka (Konferencja Modelowanie i sterowanie procesów elektrotermicznych)*, Kielce, 24 – 26 września 2007
- [15] Stryczewska H. D., Sikorski A., Ruszczyk A., Komarzyniec G., Gliding arc plasma reactor supplied from AC/DC/AC inverter, *18th International Symposium on Plasma Chemistry*, Kyoto, Japan, August 26 – 31, CD 2007
- [16] Stryczewska H.D.: "Układ zasilania reaktorów plazmy nietermicznej" Patent, P 317110, 2000
- [17] Stryczewska H.D.: „Arc Discharge Reactors Powered by Special Transformers” *International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5*, Nałęczów – Poland, 4 – 7 September 2005, str. 67
- [18] Komarzyniec G., Stryczewska H. D., Janowski T., Diatczyk J., Special Transformers in Power Systems of Arc Plasma Reactors, *1st Central European Symposium on Plasma Chemistry*, Gdańsk, May 28 – 31, 2006,
- [19] Rodacki T., A. Kandyda, *Energoelektroniczne układy zasilania plazmotronów prądu stałego*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.

## 7. MODELOWANIE REAKTORÓW ZE ŚLIZGAJĄCYM SIĘ WYŁADOWANIEM ŁUKOWYM

### 7. 1. Wstęp

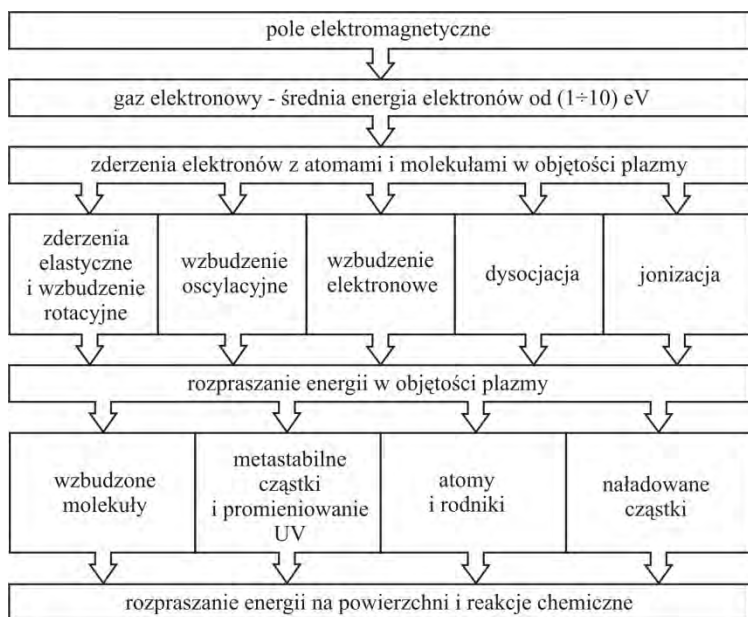
Zjawiska towarzyszące wyładowaniom elektrycznym, wykorzystywanym w technikach plazmowych, są niezwykle złożone a ich analiza wymaga wyznaczenia rozkładu pól elektromagnetycznego i temperatury, ich wzajemnych sprzężeń oraz rozwiązania równań przepływu energii, ładunku i masy. Nieliniowy charakter zjawisk w wyładowaniu łukowym, konieczność uwzględnienia i powiązania ze sobą fizycznych parametrów zjonizowanego gazu, warunków chłodzenia łuku i elektrycznych parametrów układu zasilania zawsze zmuszają, przy konstruowaniu modelu matematycznego, do przyjmowania znacznych założeń upraszczających i często wymagają wyznaczanych empirycznie charakterystyk wyładowania. Model ślizgającego się wyładowania łukowego, którego parametry znacznie różnią się od klasycznego łuku elektrycznego, powinien uwzględnić kilkunastokrotny wzrost długości kolumny i objętości wyładowania, jego zapłon i cykliczną pracę reaktora. Ważnym zagadnieniem jest zapewnienie warunków nierównowagowych generowanej plazmy, co jest związane z rozkładem temperatury w przestrzeni wyładowczej reaktora oraz określeniem energii (temperatury) cząstek plazmy, a zwłaszcza elektronów, których energie w plazmie nierównowagowej są znacznie wyższe niż pozostałych cząstek plazmy. Zjawiska te są trudne do diagnostyki i wymagają specjalnych metod i urządzeń. Modelowanie matematyczne i numeryczne tych zjawisk jest alternatywą dla kosztownych badań eksperymentalnych.

Badania nad parametrami plazmy w wytwarzanej w reaktorach plazmowych odgrywają zasadniczą rolę przy projektowaniu układów przemysłowych. Badania procesu plazmowego opiera się na wyznaczaniu jego właściwości, do których należą: chemiczny skład plazmy, energetyczny rozkład jej składników oraz procesy przenoszenia, takie jak przewodność cieplna i elektryczna plazmy. Istotnym parametrem, z punktu widzenia procesów plazmochemicznych, jest rozkład temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego. Jego analiza może być prowadzona w różny sposób, w zależności od rodzaju stosowanego reaktora (geometria elektrod) oraz od procesów fizykochemicznych zachodzących w reaktorze. Budowa modelu matematycznego reaktora plazmy nierównowagowej wymaga określenia:

- parametrów geometrycznych układu (długość, średnica i kształt elektrod, odległość między elektrodami, objętość przestrzeni wyładowania),
- parametrów przepływającego gazu (rodzaj przepływu - laminarny, turbulentny, prędkość przepływu, ciśnienie, stopień jonizacji, lepkość),
- parametrów układu zasilania (dostarczana moc, częstotliwość, wartość i kształt napięcia, impedancja układu zasilania).

Przemiany energii w nietermicznej plazmie można przedstawić w postaci schematu pokazanego na rysunku 7.1.





Rys. 7.1. Przemiany energii i zjawiska w plazmie nietermicznej

Poniżej przedstawiono klasyfikację i przegląd modeli matematycznych wyładowań łukowych. Zwrócono szczególną uwagę na możliwość zastosowania omawianych modeli do opisu zjawisk w ślizgającym się wyładowaniu łukowych. Podano wybrane wyniki modelowania numerycznego ślizgającego się wyładowania łukowego, w którym wykorzystano zmodyfikowane modele zaciskowe, zaproponowane w pracach [1], [12]. Wyniki modelowania porównano z wybranymi wynikami badań eksperymentalnych. Przedstawiono także wyniki analizy numerycznej rozkładu temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

## 7.2. Przegląd modeli matematycznych wyładowań łukowych

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

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

Pierwsze modele łuku zostały zaproponowane już na początku dwudziestego wieku. Można tu wymienić zaciskowy model empiryczny łuku elektrycznego, płonącego swobodnie między elektrodami węglowymi, pod any przez Hertę Ayrtton [12], w postaci dynamicznej charakterystyki prądowo-napięciowej uwzględniającej długość kolumny wyładowania.

Często wprowadza się podział modeli matematycznych na dwie zasadnicze grupy:

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

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

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

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

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

### **7.3. Modelowanie ślizgającego się wyładowania łukowego**

Analizę numeryczną reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym przeprowadzono wykorzystując dwa znane z literatury modele wyładowań łukowych: dynamiczną charakterystykę prądowo-napięciową oraz równania nieliniowej konduktancji wyładowań łukowych, które po modyfikacjach uwzględniających specyfikę tych wyładowań, rozwiązano numerycznie w programie MathCAD oraz wykorzystując pakiet oprogramowania Microsim PSPICE [1-3, 12].

Zależność na dynamiczną charakterystykę prądowo-napięciową wyładowania łukowego, uwzględniająca jego długość, podaną po raz pierwszy przez Hertę Ayrtton [12], przedstawia poniższe równanie:

$$u_l(t) = A + B \cdot l_l(t) + \frac{C + D \cdot l_l(t)}{i(t)} \quad (7.1)$$

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

W zależności (7.1) długość kolumny wyładowania jest stała i takie założenie dla łuku płonącego swobodnie między elektrodami o stałym odstępie jest uzasadnione. Długość ślizgającego się wyładowania łukowego wzrasta kilkunastokrotnie w czasie cyklu pracy, w stosunku do odległości elektrod w miejscu zapłonu, i takie założenie byłoby zbyt dużym uproszczeniem. Zależność (7.1) zmodyfikowano uzależniając długość wyładowania w miejscu gaśnięcia od kąta rozchylenia elektrod  $\beta$ , prędkości przepływu gazu  $v_g$  i czasu  $t$ , według:

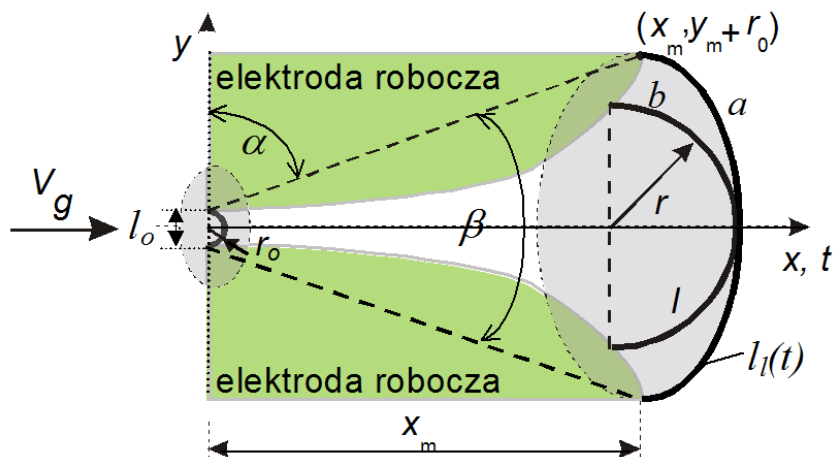
$$l_l(t) = l_o + \beta \cdot v_g \cdot t, \quad (7.2)$$

gdzie:

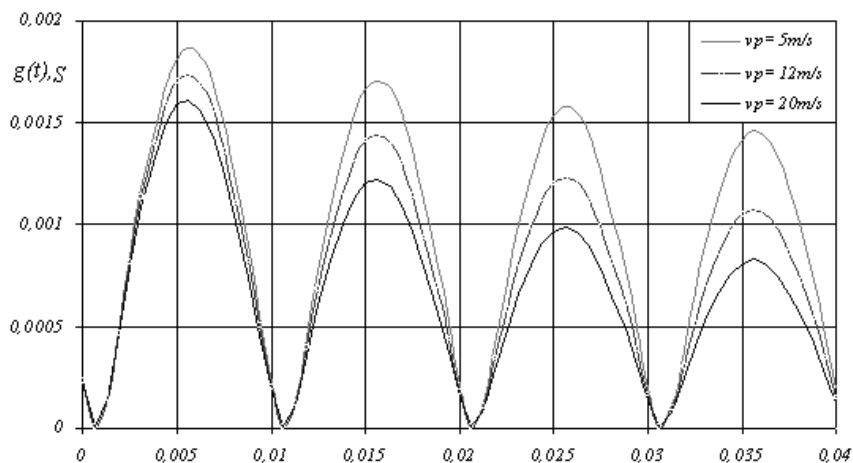
$l_o$  - początkowa odległość elektrod w miejscu zapłonu wyładowania.

Założono, zatem, że prędkość wyładowania jest równa prędkości gazu, a kolumna ma kształt części okręgu opartego na kącie  $\alpha$  rozchylenia elektrod (krzywa  $a$  na rys. 7.2).

Wybrane wyniki modelowania matematycznego ślizgającego się wyładowania zasilanego z rzeczywistego źródła napięcia sinusoidalnego w programie MathCAD, przedstawiono na rysunkach 7.3 i 7.4. Stwierdzono, że zależność na charakterystykę prądowo-napięciową wyładowania łukowego podana przez Ayrton, może dobrze odwzorowywać jakościowe przebiegi prądów i napięć w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

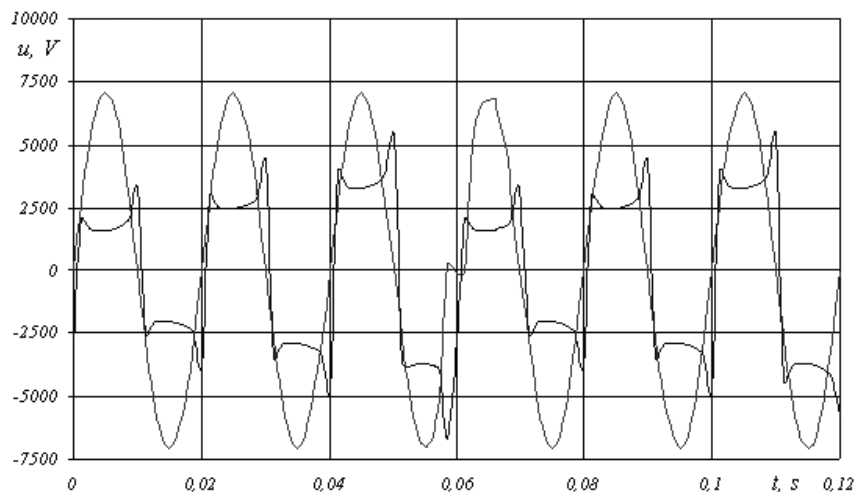


Rys. 7.2. Geometria elektrod z założonym kształtem kolumny ślizgającego się wyładowania łukowego:  $a$  – łuk oparty na kącie rozchylenia elektrod,  $b$  – kolumna w kształcie półokręgu



Rys. 7.3. Konduktancja wyładowania w funkcji czasu dla 3 prędkości gazu

Główne ograniczenia modelu związane są z koniecznością eksperymentalnego wyznaczania stałych w równaniu (7.1), zatem wyniki analiz dotyczą reaktorów o danej geometrii i nie mogą być uogólniane dla całej klasy reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.



Rys. 7.4. Prąd i napięcie wyładowania w kolejnych cyklach pracy reaktora

Sprawdzono także przydatność modeli zaciskowych Mayra i Cassiego do modelowania ślizgającego się łuku elektrycznego. Powód podjęcia próby

przystosowania w wymienionych modelach z naciskowych do analizy reaktora ze ślizgającym się łukiem wynika z prostego matematycznego opisu dynamiki wyładowania łukowego, oraz wielokrotnej weryfikacji tych modeli w modelowaniu obwodów elektrycznych z wyłącznikami prądu.

Charakterystyki konduktancji łuku dynamicznego podane przez Mayr'a i Cassie'go przedstawiają równania (7.3) i (7.4):

$$\frac{dg(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_M} g(t) = \frac{1}{\tau_M P_0} i^2(t), \quad (7.3)$$

$$\frac{dg^2(t)}{dt} + \frac{2}{\tau_c} g^2(t) = \frac{2}{\tau_c U_{st}^2} i^2(t), \quad (7.4)$$

w których :

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

$i(t)$  – natężenie prądu ,

$\tau_M$  – stała czasowa łuku przy założeniach Mayr'a,

$\tau_c$  – stała czasowa łuku przy założeniach Cassie'go,

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

$P_0$  – moc oddawana z jednostki długości kolumny łukowej.

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

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

Nieliniową konduktancję łuku zamodelowano w programie PSPICE, wykorzystując definiowane przez użytkownika bloki modelowania analogowego. Technika ABM (z ang. analog behavioral modeling) pozwala na elastyczny opis elementów obwodu elektrycznego, poprzez podanie funkcji lub tablicy wartości sygnału wyjściowego w zależności od sygnałów wejściowych. Zasada ta realizowana jest przy użyciu sterowanych źródeł napięcia i prądu oraz elementów układów sterowania.

Rozwiązaniem równań Mayr'a i Cassie'go, danych wzorami (7.3) i (7.4), są zależności na chwilową konduktancję nieliniową według:

$$g(t) = g_0 \cdot e^{\frac{1}{\tau_M} \int \left( \frac{u(t)i(t)}{P_0} - 1 \right) dt}, \quad (7.5)$$

$$g(t) = g_0 \cdot e^{\frac{1}{\tau_c} \int \left( \frac{u^2(t)}{U_{st}^2} - 1 \right) dt}, \quad (7.6)$$

gdzie:

$g_0$  – konduktancja wyładowania w miejscu zapłonu (najmniejszego odstępu elektrod), a bloki ABM realizujące obie konduktancje przedstawia rysunek 7.5.

Zmodyfikowana zależność na konduktancję chwilową ślizgającego się wyładowania łukowego ma następującą postać [1]:

$$g(t) = g_0 \cdot e^{w(t) + \int \frac{1}{\tau(g)} \left( \frac{p(t)}{P_0(g, t)} - 1 \right) dt} \quad (7.7)$$

gdzie:

$$w(t) = - \int_0^t \frac{1}{\tau(g)} \left( \frac{p(t)}{P_0(g, t)} - 1 \right) dt, \quad (7.8)$$

przy czym:

$$\tau(g) = h \cdot g^j(t), \quad (7.9)$$

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

$$P_0(g) = a \cdot g(t) + c, \quad (V.10)$$

oraz:

$$a(t) = a_0 \cdot l^2(t - t_z), \quad (7.11)$$

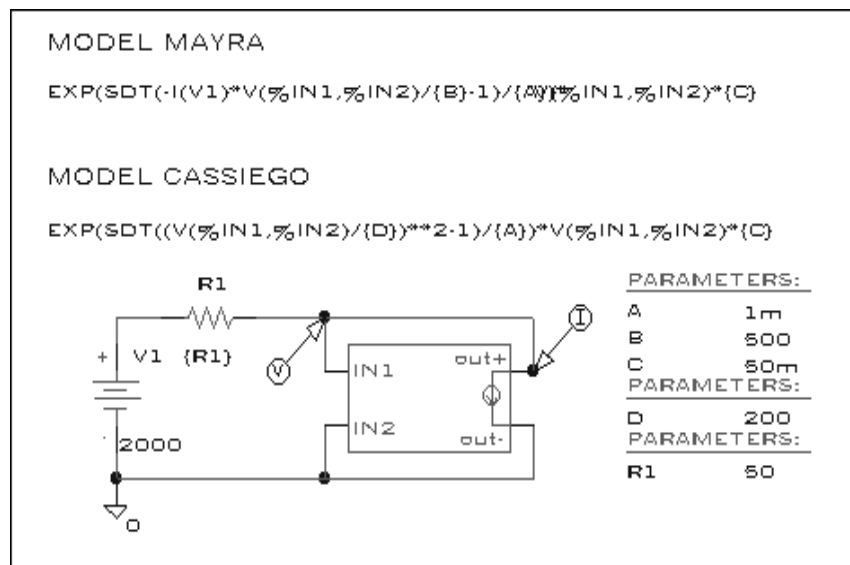
$$c(t) = c_0 \cdot l(t - t_z), \quad (7.12)$$

w których:

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

W stosunku do modeli z aciskowych Mayr'a i Cassie'go, w zaproponowanym modelu wielkość  $\tau$  zwana stałą czasową, nie jest stałą a zależy od konduktancji chwilowej wyładowania łukowego, według zależności (V.9). Elektryczny zapłon wyładowania realizowany jest w modelu za pomocą funkcji  $w(t)$  danej równaniem (V.8), zaś gęstość mocy odbieranej z kolumny

łukowej  $P_0$  (V.10) jest liniową funkcją konduktancji chwilowej  $g(t)$ , przy czym współczynniki  $a$  i  $c$ , dane zależnościami (V.11) i (V.12), są funkcjami czasu zapłonu  $t_z$  oraz długości wyładowania  $l$ .



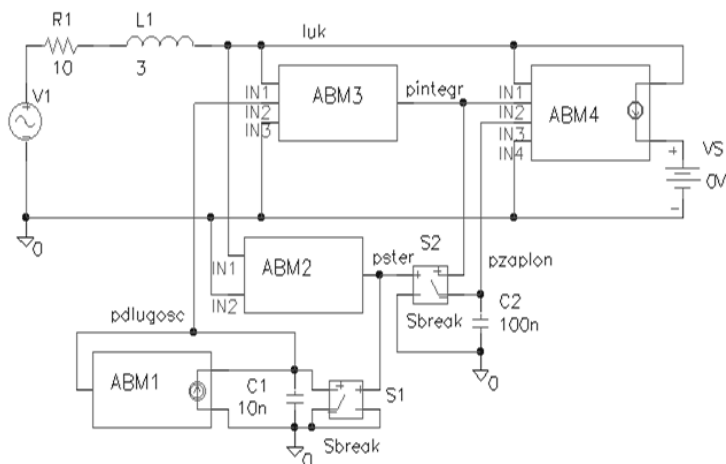
Rys. 7.5. Bloki ABM realizujące równania Mayr'a i Cassie'go łuku elektrycznego [1]

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że kolumna wyładowania ma kształt półokręgu, tak jak to przedstawia rysunek 7.2 – krzywa  $b$ , a wyładowanie zasilane jest z rzeczywistego źródła napięcia sinusoidalnego  $V1$  o rezystancji wewnętrznej  $R1$  (rys. 7.5). Realizacja modelu ślizgającego się wyładowania łukowego za pomocą bloków ABM, według zmodyfikowanego równania danego zależnością (7.7), jest przedstawiona na rysunku 7.6.

Bloki ABM, ze schematu przedstawionego na rysunku 7.6, realizują następujące funkcje:

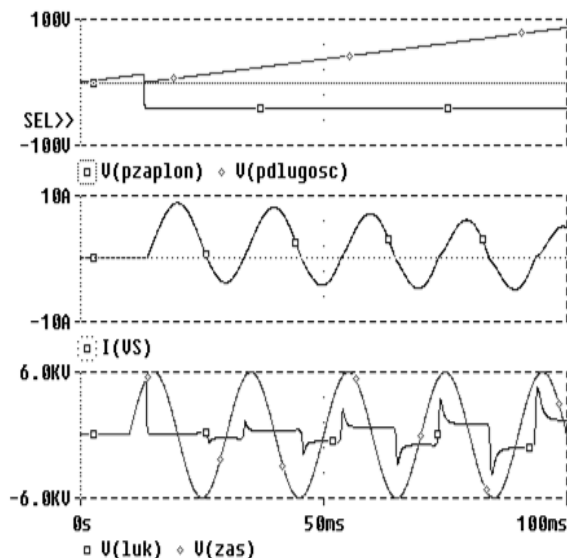
- elementy ABM3 i ABM4 są odpowiedzialne za realizację nieliniowej konduktancji,
- blok ABM2 wraz z wyłącznikiem sterowanym napięciowo  $S2$  i kondensatorem  $C2$ , służą do generowania funkcji  $w(t)$  realizującej zapłon napięciowy,
- element ABM1, wyłącznik  $S1$  i kondensator  $C1$ , modelują zmiany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

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



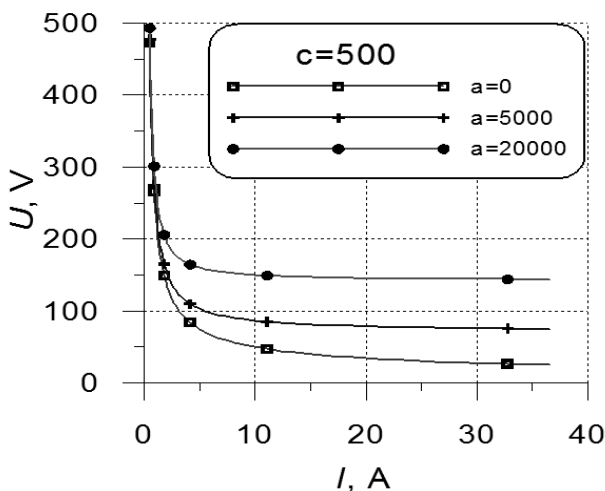
Rys. 7.6. Model ślizgającego się wyładowania łukowego [1]

Przebiegi napięcia i prądu wyładowania oraz charakterystyki statyczne, uzyskane podczas analizy numerycznej, przedstawiono na rysunkach 7.7 i 7.8, zaś porównanie wyników obliczeń z przebiegami z arejestrowanymi na oscyloskopie na rysunkach 7.9 i 7.10.

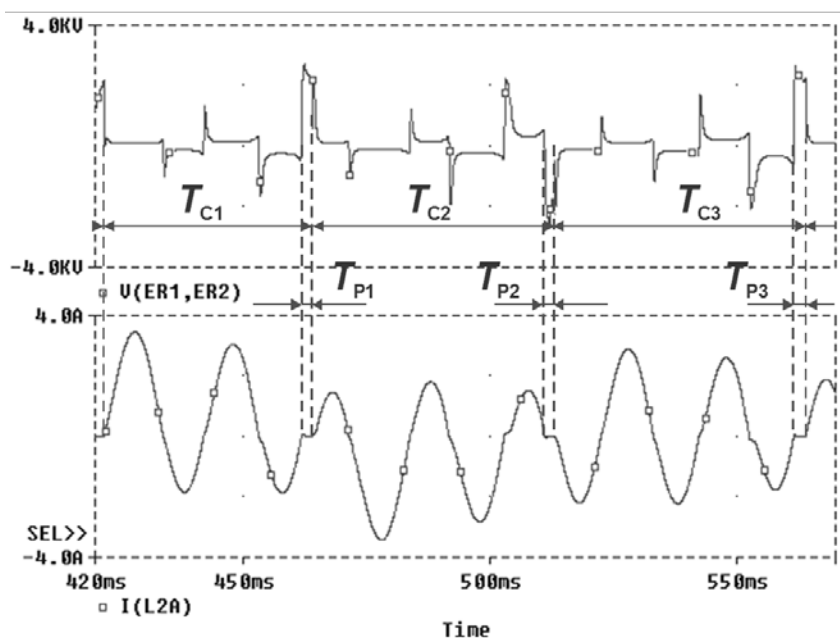


Rys. 7.7. Wyniki modelowania ślizgającego się łuku w jednofazowym obwodzie RL w czasie 1 cyklu pracy [1]

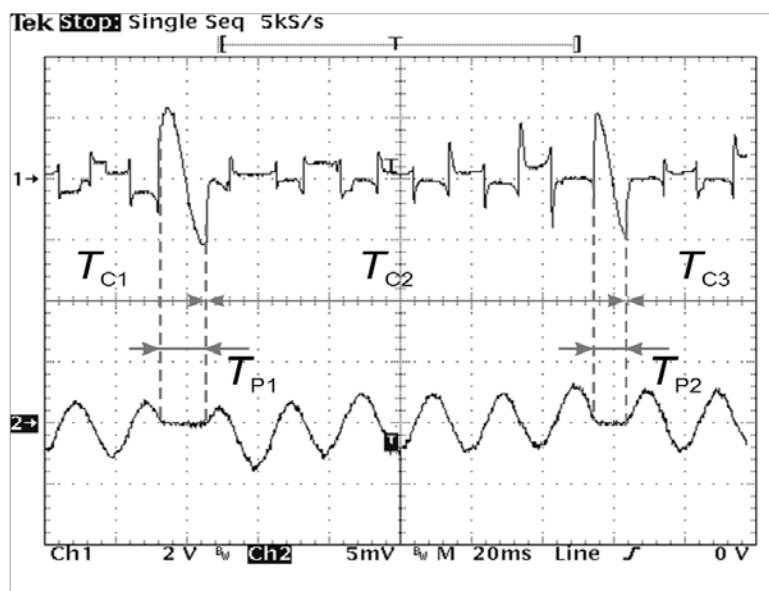




Rys. 7.8. Charakterystyki statyczne symulowanego wyładowania [1]



Rys. V79. Napięcie (górny przebieg) i prąd (poniżej) ślizgającego się wyładowania łukowego - wyniki uzyskane numerycznie [1]



Rys. 7.10. Napięcie (górny przebieg) i prąd (poniżej) ślizgającego się wyładowania łukowego - wyniki uzyskane numerycznie

Modyfikacje zaciskowych modeli matematycznych wyładowań łukowych pozwalają na przeprowadzenie numerycznej analizy i symulację wzajemnego oddziaływania układu reaktor plazmowy- źródło zasilania, w różnych stanach pracy i przy różnych założeniach upraszczających. Uwzględnienie w modelu Ayrton zmiennej długości wyładowania pozwala uzyskać jakościowe wyniki zgodne z eksperymentami, choć nie pozwala ich uogólnić na szerszą klasę reaktorów, z uwagi na występujące w modelu wyładowania współczynniki empiryczne, konieczne do wyznaczenia w obiekcie rzeczywistym.

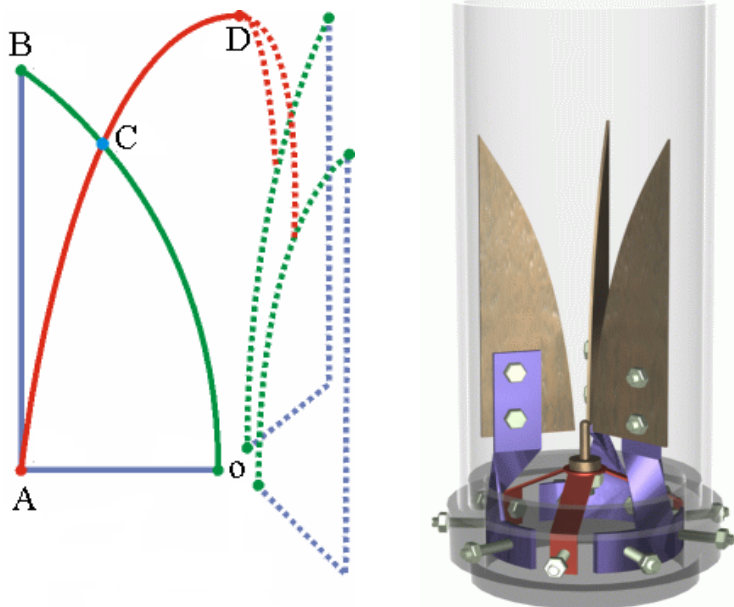
Modyfikacje modeli zaciskowych Mayr'a i Cassie'go pozwalają uzyskać wyniki modelowania, które prezentują wysoką zgodność jakościową z przebiegami zjawisk w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Porównując wyniki uzyskane z modelu numerycznego z zarejestrowanymi na oscyloskopie w obiekcie rzeczywistym (rysunki 7.9 i 7.10) można stwierdzić, że model dobrze odwzorowuje cykliczność pracy reaktora, przerwy bezprądowe oraz kształty prądów i napięć reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym i może być wykorzystany do symulacji takich obiektów.

W reaktorach plazmy nierównowagowej ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym istotnym parametrem jest długość krytyczna wyładowania. Definiujemy ją jako odległość międzyelektrodową, po przekroczeniu której następuje zmiana sposobu jonizacji i wytwarzana plazma jest w stanie nierównowagi termodynamicznej. Długość krytyczna wyładowania jest także ważna przy wyznaczaniu temperatury elektronów.

Rozwój wyładowania elektrycznego jest podzielony na dwa obszary:

- przy długości łuku mniejszej od krytycznej w reaktorze wytwarzana jest plazma niskotemperaturowa w lokalnej równowadze termodynamicznej, dla której wyznaczenie rozkładu temperatury jest możliwe w oparciu o prawa termodynamiki i promieniowania optycznego gazów zjonizowanych;
- natomiast, dla długości łuku większej od krytycznej wytwarzana jest nierównowagowa plazma niskotemperaturowa, dla której analityczne wyznaczenie rozkładu pola temperatury w oparciu o prawa termodynamiki jest niemożliwe ze względu na istotne odchylenia od rozkładu Maxwella i nie spełnienie prawa Boltzmanna oraz prawa działania mas.

Do wyznaczenia długości krytycznej oraz przedstawionych dalej badań symulacyjnych i eksperymentalnych wykorzystano geometrię trójelektrodową reaktora plazmowego pokazaną na rysunku 7.11. Minimalna odległość elektrod wynosiła od 2 mm do 5 mm, a przestrzeń międzyelektrodowa wypełniona była argonem, azotem lub powietrzem. Przepływ gazu roboczego był regulowany w granicach od  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$  do  $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Rys. 7.11. Geometria elektrod w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

Ponieważ elektroda zapłonowa wspomaga jedynie wstępną jonizację przestrzeni międzyelektrodowej oraz inicjuje zapłon wyładowania, w dalszych rozważaniach dotyczących długości krytycznej wyładowania i obliczania pola temperatury, jej wpływ zostanie pominięty.

### 7.2.1. Uproszczony model matematyczny do wyznaczenia krytycznej długości łuku

Uwzględniając symetrię elektrod względem osi oD (rys. 7.11) możemy rozpatrywać jedną elektrodę oABC oraz wyładowanie w obszarze CD.

W celu uproszczenia modelu matematycznego, w stosunku do modelu fizycznego elektrody reaktora możemy potraktować jako doskonale przewodzące (o zerowej rezystancji). Natomiast wszystkie straty energii odbywają się poprzez zjawiska jonizacji i rekombinacji w wyładowaniu łukowym.

W łuku dynamicznym zmienia się w czasie energia akumulowana, a tym samym zmienia się temperatura ( $T$ ) i przewodność elektryczna ( $g$ ) wyładowania. Aby rozwiązać równanie dynamiki wyładowania w funkcji  $T$  i  $g$  konieczne jest wprowadzenie uproszczeń dotyczących sposobu oddawania energii z łuku elektrycznego. Dlatego też do prześledzenia zmian konduktancji wyładowania łukowego wykorzystane zostało równanie Mayra. Zakładając, że temperatura łuku dynamicznego jest zmienna w czasie i przestrzeni oraz, że wartość oddawanej objętościowo mocy z jednostki długości łuku jest stała, można zapisać równanie przewodności jednostki długości łuku elektrycznego  $g(t)$  w zależności od chwilowej wartości prądu  $i(t)$ :

$$\frac{dg(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_M} g(t) = \frac{1}{\tau_M P_0} i^2(t), \quad (7.13)$$

w którym:

$\tau_M$  - stała Mayra, s,  $t$  - czas, s,

$P_0$  - moc oddawana z jednostki długości łuku,  $Wm^{-1}$ .

Równania (7.13) ma dokładne rozwiązanie przy założeniu, że prąd wyładowania  $i(t)$  jest sinusoidalny. Takie założenie jest w wielu przypadkach praktycznie udowodnione. Na rysunku 7.10 przedstawiono oscylogramy prądu i napięcia w ślizgającym się wyładowaniu łukowym, potwierdzające słuszność przyjętego założenia. Uwzględniając w równaniu (7.13), sinusoidalny przebieg prądu:

$$i(t) = I_m \sin \omega t, \quad (7.14)$$

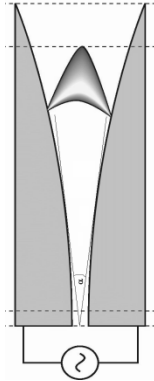
i po rozwiązaniu równania Mayra otrzymuje się wzór na konduktancję jednostki długości łuku elektrycznego w funkcji czasu według:

$$g(t) = \frac{I_m^2}{2lP_0} \left[ 1 - \frac{\cos 2\omega t + 2\tau_M \omega \sin 2\omega t}{1 + (2\tau_M \omega)^2} \right], \quad (7.15)$$

gdzie:

$I_m$  - wartość maksymalna prądu, A,

$\omega$  - pulsacja,  $s^{-1}$ ,  $l$  - długość wyładowania, m.



Rys. 7.12. Określenie długości łuku w oparciu o kąt rozchylenia elektrod

Długość łuku w funkcji czasu może być wyznaczona jako część łuku opartego na kącie rozchylenia elektrod (rysunek 7.12):

$$l(t) = l_0 + \alpha \cdot v \cdot t, \quad (7.16)$$

gdzie:

$l_0$ - długość łuku w miejscu jego zapłonu, m,

$v$ - prędkość gazu, m/s,  $\alpha$ - kąt rozchylenia elektrod, rad.

Uwzględniając w równaniu (7.14) zmienną w czasie długość łuku  $l(t)$  otrzymamy:

$$g(t) = \frac{I_m^2}{2l(t)P_0} \left[ 1 - \frac{\cos 2\omega t + 2\tau_M \varpi \sin 2\omega t}{1 + (2\tau_M \omega)^2} \right]. \quad (7.17)$$

Na podstawie zależności (7.17) można wyznaczyć moc chwilową wyładowania  $p(t)$ :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \frac{i(t)}{g(t)} \cdot i(t) = \frac{i^2(t)}{g(t)}. \quad (7.18)$$

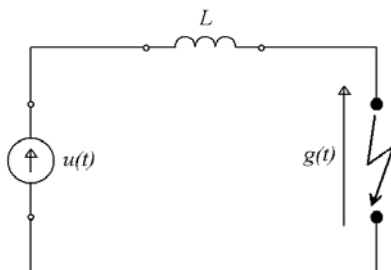
Porównując moc traconą w wyładowaniu z mocą dostarczoną z układu zasilania możemy wyznaczyć długość krytyczną łuku.

Dla dwuelektrodowego reaktora zasilanego z układu zasilania o reaktancji wewnętrznej  $\omega L$  prądem sinusoidalnym, możemy posłużyć się uśrednioną na okres  $T$  wartością konduktancji reprezentującą wyładowanie łukowe:

$$\tilde{G} = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt = \frac{I_m^2}{2l_k P_0}. \quad (7.19)$$

Przyjmując schemat zastępczy reaktora dwuelektrodowego przedstawiony na rysunku 7.13, w którym wyładowanie łukowe reprezentowane jest przez konduktancję  $\tilde{G}$ , a reaktancję wewnętrzną układu zasilania modeluje indukcyjność  $L$ , wychodząc z warunku dopasowania ( $\frac{1}{\omega L} = \tilde{G}$ ), przy którym ze źródła do odbiornika przekazywana jest maksymalna moc, otrzymuje się uproszczoną zależność na krytyczną długość ( $l_k$ ) wyładowania łukowego:

$$l_k = \frac{\omega L I_m^2}{2P_0} \quad (7.20)$$



Rys. 7.13. Obwód zastępczy reaktora dwuelektrodowego

Istotnym, z praktycznego punktu widzenia, jest czas, po jakim wyładowanie osiągnie długość krytyczną ( $l_k$ ). Do wyznaczenia krytycznego czasu ( $t_k$ ) należy do równania (7.16) podstawić wartość długości krytycznej z równania (7.20):

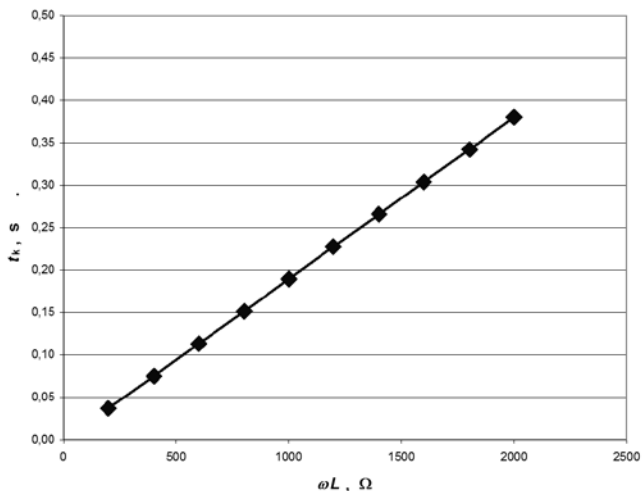
$$t_k = \frac{\omega L I_m^2 - 2P_0 l_0}{2P_0 \alpha v} \quad (7.21)$$

Następnym krokiem było zbadanie wpływu poszczególnych parametrów na wartość czasu krytycznego ( $t_k$ ). Przyjęte do obliczeń parametry zestawiono w tabeli 7.1.

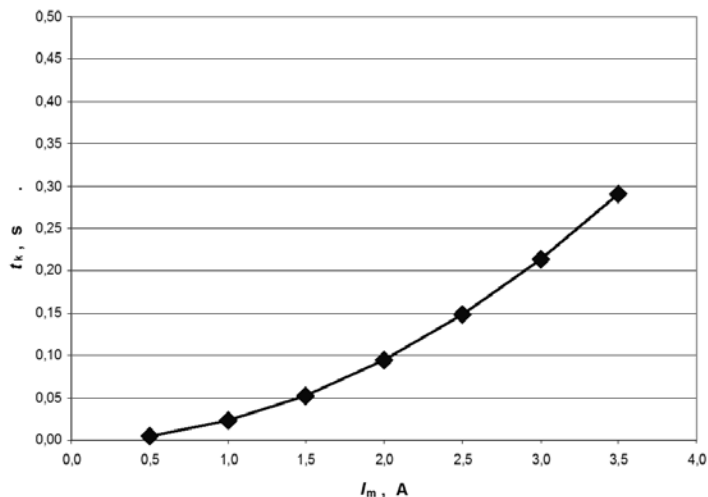
Tabela 7.1. Parametry symulacji

| Parametr                                              | Wartość |
|-------------------------------------------------------|---------|
| reaktancja wewnętrzna ( $\omega L$ ), $\Omega$        | 500     |
| wartość maksymalna prądu ( $I_m$ ), A                 | 2       |
| prędkość gazu ( $v$ ), m/s                            | 10      |
| moc oddawana z jednostki długości łuku ( $P_0$ ), W/m | 2000    |
| długość łuku w miejscu jego zapłonu ( $l_0$ ), m      | 0,006   |
| kąt rozchylenia elektrod ( $\alpha$ ), rad            | $\pi/6$ |

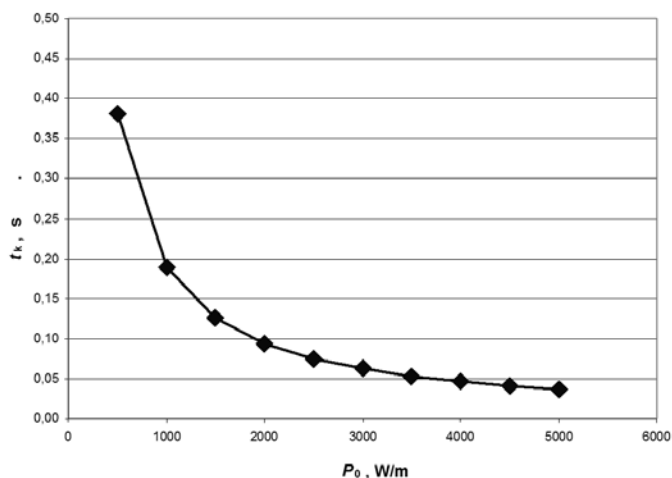
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono zależność czasu krytycznego od reaktancji wewnętrznej (rysunek 7.14), wartości maksymalnej prądu (rysunek 7.15), mocy oddawanej z jednostki długości łuku (rysunek 7.16), prędkości przepływu gazu przez komorę wyladowczą reaktora (rysunek 7.17) oraz kąta rozchylenia elektrod roboczych reaktora (rysunek 7.18).



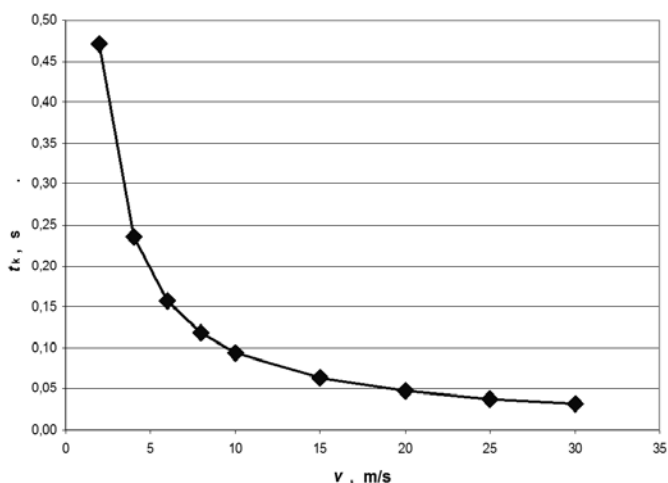
Rys. 7.14. Zależność czasu krytycznego od reaktancji wewnętrznej



Rys. 7.15. Zależność czasu krytycznego od wartości maksymalnej prądu



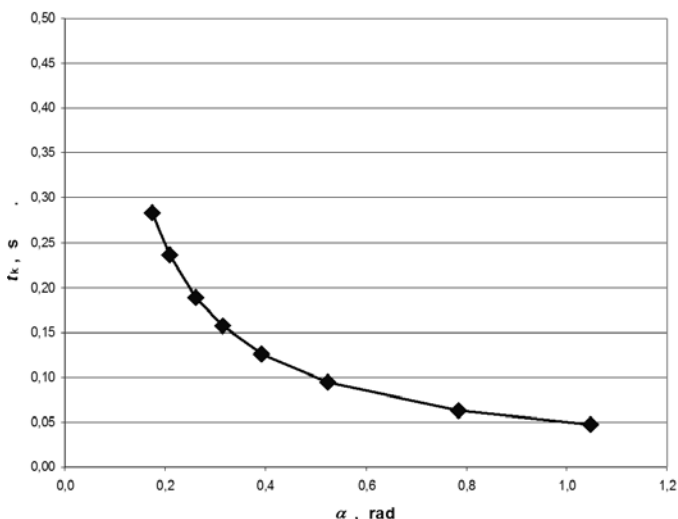
Rys. 7.16. Zależność czasu krytycznego od mocy oddawanej z jednostki długości łuku



Rys. 7.17. Zależność czasu krytycznego od prędkości przepływu gazu

W uproszczonym modelu reaktora dwuelektrodowego zasilanego z źródła napięcia sinusoidalnego o stałej indukcyjności wewnętrznej  $L$  pokazanym na rysunku 7.13, przejście ze stanu równowagowego wyładowania do stanu nierównowagowego następuje przy długości krytycznej opisanej zależnością (7.20). Czas, po jakim następuje takie przejście, określony jest zależnością (7.21).





Rys. 7.18. Zależność czasu krytycznego od kąta rozchylenia elektrod

Z przeprowadzonej analizy wynika, że czas krytyczny liniowo zależy od reaktancji wewnętrznej, a więc należy zapewnić możliwie niską jej wartość. Z drugiej strony, z badań eksperymentalnych wynika, iż mała wartość reaktancji wewnętrznej prowadzi do występowania przerw bezprądowych i niestabilności wyładowania. Zatem dobór wartości reaktancji wewnętrznej jest jednym z istotnych zadań przy projektowaniu układów zasilania reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

Wzrost wartości maksymalnej prądu powoduje wydłużenie czasu krytycznego, a więc istotne jest zapewnienie wysokiego napięcia niezbędnego do zapłonu i rozwoju wyładowania i ograniczenie wartości maksymalnej prądu. Z kolei, ograniczenie prądu powoduje zmniejszenie mocy dostarczanej do wyładowania, a jego zwiększenie prowadzi do równowagi termodynamicznej, dlatego dobór właściwej wartości prądu powinien uwzględniać specyfikę procesów plazmowych przeprowadzanych z wykorzystaniem reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

Prędkość przepływu gazu przez komorę wyładowczą zależy od konkretnego zastosowania reaktora. Należy brać pod uwagę, iż wzrost prędkości przepływu pozwala skrócić czas, po jakim zapewnione zostaną nierównowagowe warunki generacji plazmy nietermicznej.

Zwiększenie kąta rozchylenia elektrod roboczych powoduje skrócenia czasu krytycznego. Należy jednak pamiętać, iż spowoduje to także skrócenie czasu trwania cyklu pracy reaktora, przez co zmniejszeniu ulega obszar komory wyładowczej wypełnionej plazmą nierównowagową.

### 7.2.2. Symulacja rozkładu temperatury w komorze wyładowczej

Budowa modelu matematycznego opisującego rozkład temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmy nierównowagowej wymaga określenia:

- parametrów geometrycznych układu (długość i średnica elektrod, odległość między elektrodami),
- parametrów przepływającego gazu (rodzaj przepływu -laminarny, turbulentny, prędkość przepływu, ciśnienie, stopień jonizacji),
- parametrów układu zasilania (dostarczana moc, częstotliwość, kształt napięcia).

Stopień jonizacji gazu, prędkość, temperatura cząstek i ciśnienie opisywane są równaniami zachowania masy, pędu i energii. Zakładając laminarny przepływ plazmy w reaktorze, równania wiążące podstawowe parametry fizyczne plazmy, wynikające z wymienionych równań równowagi w układzie współrzędnych cylindrycznych mają postać:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (7.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u v) = 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (7.23)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v^2) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{2 \mu v}{r^2} - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (7.24)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial z} - \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial r} + \sigma E^2 = 0 \quad (7.25)$$

$$E = \frac{I}{2\pi \int_0^R \sigma \cdot r \cdot dr} \quad (7.26)$$

gdzie:

$r$ – współrzędna biegunowa;  $v$ – prędkość promieniowa gazu;

$u$ – prędkość osiowa gazu;  $E$ – napięcie;

$z$ – współrzędna osiowa;  $\mu$ – lepkość gazu;

$\rho$ – gęstość gazu;  $\sigma$ – konduktywność elektryczna gazu;

$c_p$ – ciepło właściwe;  $\lambda$ – konduktywność termiczna gazu;

$T$ – temperatura;  $P$ – ciśnienie gazu;  $I$ – natężenie prądu.

Powyższe równania mogą zostać rozwiązane za pomocą dowolnych metod numerycznych, przy czym najprościej jest zastosować metodę różnic skończonych lub elementów skończonych. Ze względu na małą wartość prędkości promieniowej plazmy w porównaniu z osiową ( $\rho_v = 0,05 \rho_u$ ), czynnik z nią związany w równaniu bilansu mocy można pominąć. Upraszcza to równanie (7.25) nie wpływając w znaczny sposób na wyniki obliczeń. W praktyce pojawiają

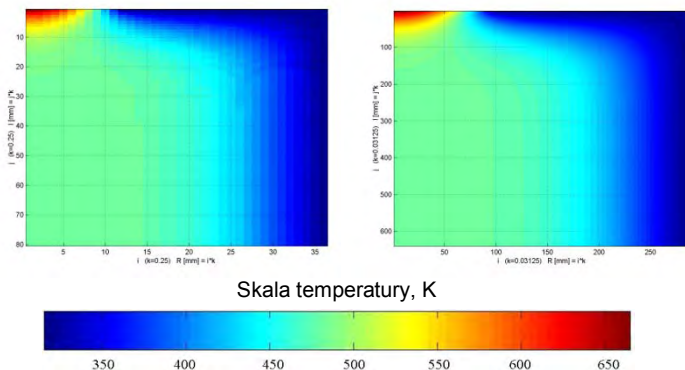
się trudności z rozwiązaniem równania (7.25) ze względu na złożoną zależność parametrów  $\lambda$ ,  $c_p$ ,  $\sigma$  i  $\rho$  od aktualnej temperatury. W modelu matematycznym przyjęto na podstawie pomiarów, że wyżej wymienione parametry są nieliniowo zależne od temperatury. W podobny sposób wprowadzone zostały do modelu matematycznego pozostałe parametry zależne od temperatury.

Równanie różniczkowe drugiego rzędu (7.25) bilansu mocy w kolumnie łukowej można przekształcić do równania różnicowego korzystając z metody LBI (ang. linearized block implicate) opracowanej przez Briley & McDonald. W tym celu wprowadzono do analizowanego układu kwadratową siatkę dyskretyzującą.

Przed rozpoczęciem obliczeń ustawiane są parametry początkowe symulacji:

- osiowa prędkość gazu:  $u = 10$  m/s;
- ciśnienie:  $p = 101325$  Pa (1 atm);
- natężenie prądu:  $I = 1$  A;
- długość elektrody:  $a = 30$  mm;
- długość komory wyladowczej:  $l = 200$  mm;
- szerokość komory wyladowczej:  $R = 90$  mm.

Implementacja algorytmu została zrealizowana w środowisku programistycznym MATLAB w wersji 6.5 firmy MathWorks. W pierwszej kolejności ustawiane są parametry początkowe symulacji oraz warunki brzegowe. Następnie iteracyjnie wyznaczana jest macierz temperatury. Obliczenia iteracyjne kończą się w przypadku zmiany temperatury dla każdej komórki macierzy nie przekraczającej 10K (w stosunku do wartości z poprzedniej iteracji) lub, gdy liczba iteracji przekroczy 100. Po zakończeniu obliczeń istnieje możliwość zagęszczenia siatki (zwiększenie wymiarów macierzy temperatury) i ponowne wyznaczenie wszystkich elementów macierzy temperatury.



Rys. 7.19. Wyniki modelowania pola temperatury

Z wyników symulacji wynika, że największą temperaturę obserwujemy przy elektrodzie, obok dyszy wlotowej gazu. W pobliżu ścianek zewnętrznych komory wyladowczej wartość temperatury zbliża się do temperatury otoczenia. Wzdłuż osi symetrii, obserwujemy spadek temperatury do wartości 450 – 550 K

oraz brak zmiany temperatury wraz z oddalaniem się od dyszy wlotowej. Mimo zaniechania w obliczeniach prędkości promieniowej gazu, obserwujemy znaczące zmiany temperatury wraz z oddalaniem się od środka (osi symetrii) komory wyładowczej.

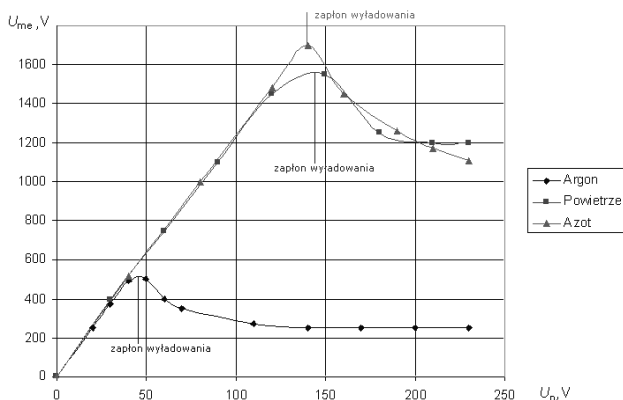
Taki rozkład temperatury wewnątrz komory wyładowczej spowodowany jest początnymi w modelu uproszczeniami, z których największy wpływ ma założenie laminarnego przepływu gazu, co w warunkach praktycznych jest trudne do spełnienia.

### 7.3. Wyniki badań eksperymentalnych

#### 7.3.1. Moc ślizgającego się wyładowania

Stworzenie procesów generacji plazmy nierównowagowej w reaktorze plazmowym ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym odbywa się poprzez zmiany parametrów układu zasilania [4].

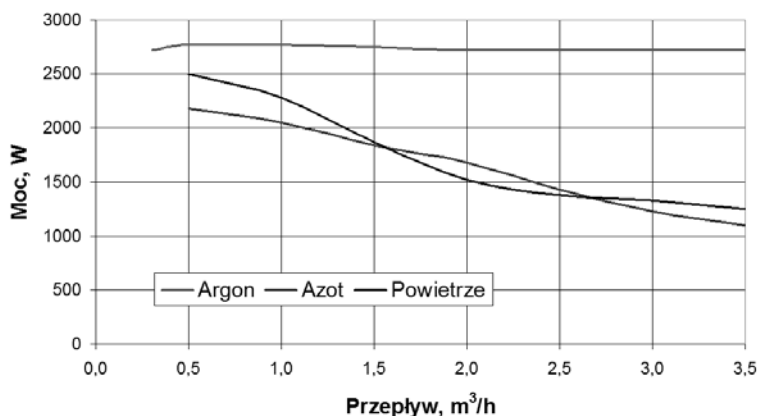
Przedstawione na rysunku 7.20 charakterystyki napięcia międzyelektrodowego w funkcji zmian napięcia pierwotnego transformatorów pozwalają na wyznaczenie obszarów stabilnej pracy urządzenia plazmowego. Międzyelektrodowe napięcie zapłonu wyładowania w powietrzu wynosi 1550V. W atmosferze azotu zapłon wyładowania następuje przy 1700V, zaś w argonie przy 500V. Po wystąpieniu zapłonu wyładowania, napięcie łuku początkowo spada, mimo wzrostu napięcia pierwotnego transformatorów, a następnie ustala się na wartości 1200V dla powietrza, 1100V dla azotu i 250V dla argonu. Ustalane wartości napięć wyznaczają obszar stabilnej pracy reaktora plazmowego. W przedziale napięć od napięcia zapłonu do napięcia ustalonego praca reaktora plazmowego odbywa się z częstymi i nieregularnymi przerwami bezprądowymi, podczas których może nastąpić nawet całkowite zgaszenie wyładowania.



Rys. 7.20. Charakterystyki napięciowe  $U_{me} = f(U_p)$  trójelektrodowego reaktora plazmowego z elektrodą zapłonową zasilanego ze zintegrowanego układu zasilania wyposażonego w elektroniczny system zapłonowy,  $U_{me}$  – napięcie między elektrodami roboczymi,  $U_p$  – napięcie pierwotne transformatora [5, 12]

Z punktu widzenia badań rozkładu temperatury wewnątrz komory wyladowczej reaktora plazmowego, istotna jest wartość mocy dostarczanej z układu zasilania do ślizgającego się wyladowania. Przeprowadzono badania trzech różnych układów zasilania: układu zintegrowanego, układu wykorzystującego transformator ze rdzeniem amorficznym oraz układu opartego na transformatorze pięciokolumnowym, obciążonych trzelektrodowym reaktorem plazmowym. Dla każdego układu wykonano pomiary mocy dostarczanej do wyladowania łukowego w argonie, azocie, powietrzu oraz ich mieszaninach przy różnych prędkościach przepływu.

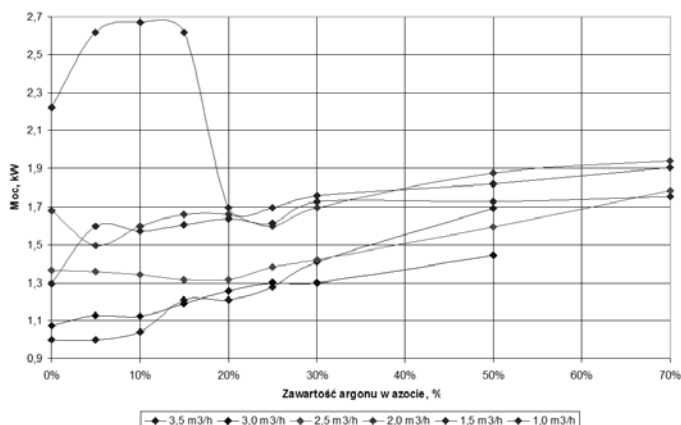
Zależność mocy dostarczanej do wyladowania od rodzaju i wartości przepływu gazu roboczego dla reaktora plazmowego zasilanego z układu wykorzystującego transformator o rdzeniu amorficznym przedstawiono na rysunku 7.21.



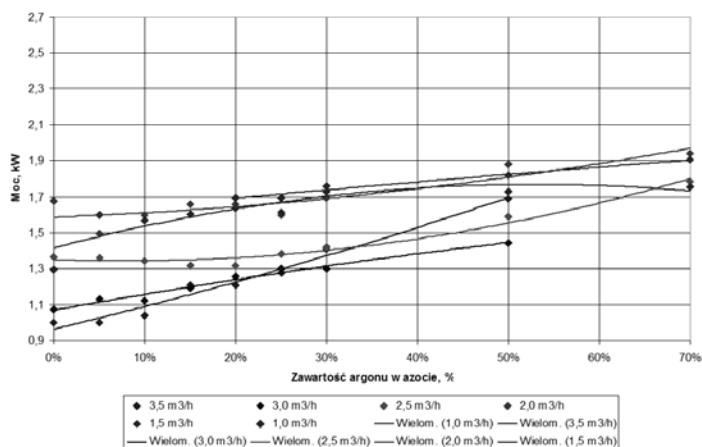
Rys. 7.21. Zależność mocy dostarczanej do wyladowania od rodzaju i wartości przepływu gazu procesowego (transformator na rdzeniu amorficznym, napięcie po stronie pierwotnej  $U_p = 130$  V)

Na podstawie powyższych charakterystyk, można stwierdzić, iż w przypadku stosowania argonu jako gazu procesowego moc do starczana do wyladowania nie zależy od wartości przepływu. Przy zastosowaniu azotu lub powietrza, jako gazu roboczego, wraz ze wzrostem szybkości przepływu wartość mocy maleje.

Dla tego samego układu zasilania (rdzenie amorficzne) zbadany został wpływ zmiany procentowej zawartości argonu w gazie procesowym na wartość mocy dostarczanej do wyladowania dla różnych wartości przepływu (rysunek 7.22). Z rysunku wynika, iż dla najniższej wartości przepływu ( $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ), stabilizacja wyladowania następuje dopiero przy zawartości argonu w gazie procesowym większej od 20%. Na rysunku 7.23 zaprezentowana jest aproksymowana zależność mocy dostarczanej do wyladowania, od zawartości argonu w gazie procesowym.



Rys. 7.22. Wyniki pomiaru zależności mocy dostarczanej do wyładowania od zawartości argonu w gazie procesowym dla różnych wartości przepływu (transformatory na rdzeniu amorficznym, napięcie po stronie pierwotnej  $U_p = 130$  V)

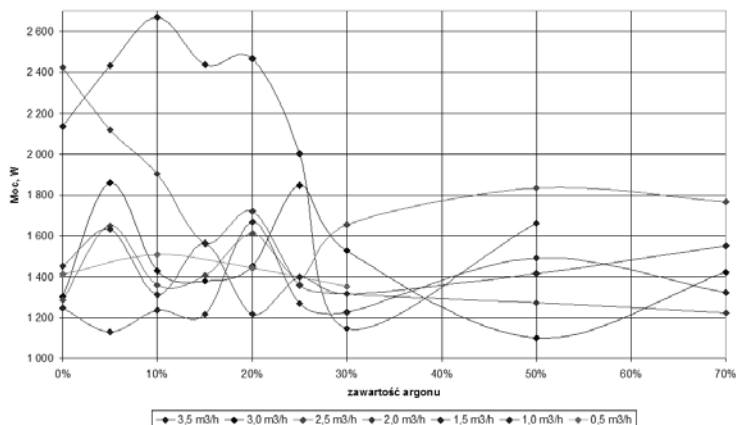


Rys. 7.23. Aproksymacja zależności mocy dostarczanej do wyładowania od zawartości argonu w gazie procesowym dla różnych wartości przepływu (transformatory na rdzeniu amorficznym, napięcie po stronie pierwotnej  $U_p = 130$  V)

Jak wynika z rysunku 7.23, zwiększenie zawartości argonu w gazie procesowym prowadzi do zwiększenia mocy dostarczanej do wyładowania oraz do stabilizacji wyładowania, co jest szczególnie istotne dla małych wartości przepływów.

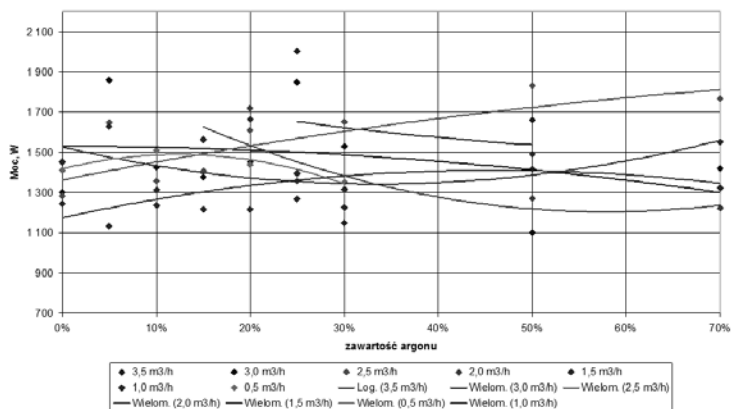
Analogicznym badaniom (rys. 7.24) poddany został zintegrowany układ zasilania, który charakteryzuje się miękką charakterystyką zewnętrzną. Cecha ta

pozwała zainicjować zapłon wyładowania przy niższych prędkościach przepływu gazu roboczego.



Rys. 7.24. Wyniki pomiaru zależności mocy dostarczanej do wyładowania od zawartości argonu w gazie procesowym dla różnych wartości przepływu (zintegrowany układ zasilania, napięcie po stronie pierwotnej  $U_p = 230$  V)

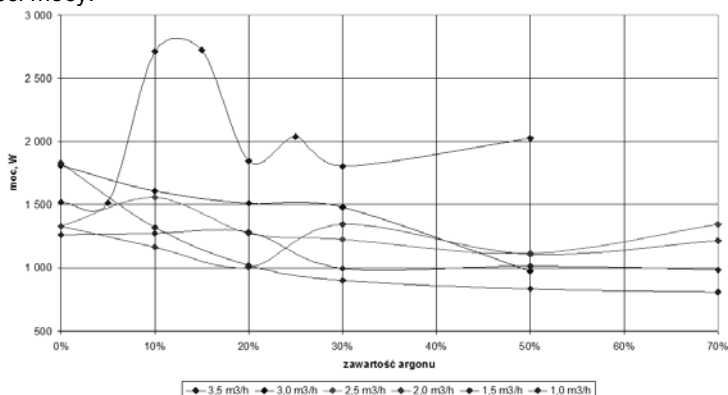
Aproksymacje powyższych charakterystyk przedstawiono na rysunku 7.25. Dla zintegrowanego układu zasilania charakterystyczne jest stabilizowanie się mocy dostarczanej do wyładowania łukowego przy zawartości argonu w gazie roboczym powyżej 30%. Zaobserwować można także zbliżoną do liniowej zależność mocy w funkcji zawartości argonu dla poszczególnych wartości przepływu (rysunki 7.24 i 7.25).



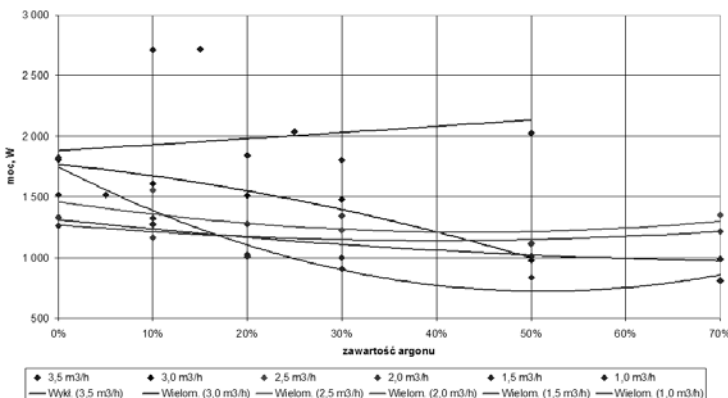
Rys. 7.25. Aproksymacja zależności mocy dostarczanej do wyładowania od zawartości argonu w gazie procesowym dla różnych wartości przepływu (zintegrowany układ zasilania, napięcie po stronie pierwotnej  $U_p = 230$  V)

Wyniki pomiaru zależności mocy dostarczanej do wyładowania od zawartości argonu w gazie procesowym w przypadku zasilania reaktora plazmowego z transformatora pięciokolumnowego przedstawiono na rysunku 7.26, natomiast aproksymacje tych charakterystyk zaprezentowano na rysunku 7.27.

W przypadku zastosowania transformatora 5-kolumnowego w układzie zasilania reaktora plazmowego, wzrost prędkości przepływu gazu roboczego powoduje wzrost mocy dostarczanej do wyładowania. Natomiast wzrost koncentracji argonu jedynie stabilizuje wyładowanie, nie zmieniając znacząco wartości mocy.



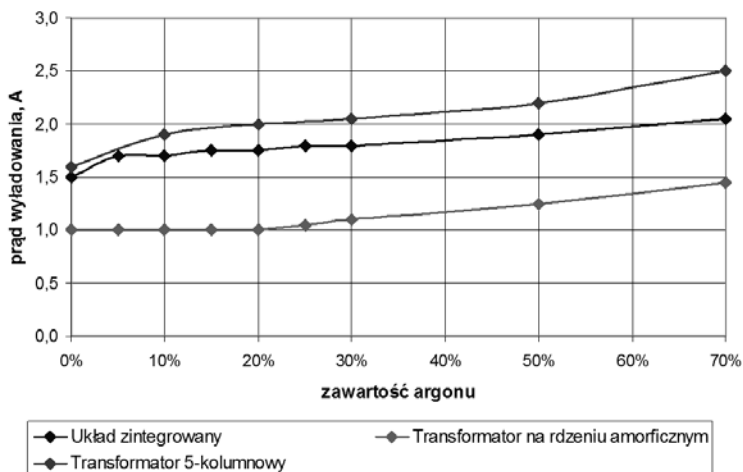
Rys. 7.26. Wyniki pomiaru zależności mocy dostarczanej do wyładowania od zawartości argonu w gazie procesowym dla różnych wartości przepływu (transformator 5-kolumnowy, napięcie po stronie pierwotnej  $U_p = 110$  V)



Rys. 7.27. Aproksymacja zależności mocy dostarczanej do wyładowania od zawartości argonu w gazie procesowym dla różnych wartości przepływu (transformator 5-kolumnowy, napięcie po stronie pierwotnej  $U_p = 110$  V)



Cechą wspólną badanych układów zasilania jest wzrost wartości prądu wyładowania przy wzroście zawartości argonu w gazie procesowym (rysunek 7.28).



Rys. 7.28. Zależność prądu wyładowania od zawartości argonu w gazie procesowym dla różnych układów zasilania (gaz procesowy – azot, wartość przepływu –  $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ )

Czynnikiem decydującym o przekazywaniu mocy do ślizgającego się wyładowania łukowego jest odpowiednio zaprojektowany układ zasilania, a szczególne znaczenie odgrywa reaktancja wewnętrzna transformatorów zasilających elektrody robocze [13]. Stosując różne układy do zasilania reaktora pracującego z wykorzystaniem tego samego gazu procesowego, można kontrolować moc przekazywaną do danego procesu plazmochemicznego.

Z przedstawionych przebiegów wynika również, iż obszar stabilnej pracy reaktora plazmowego zależy od składu chemicznego atmosfery, w jakiej zachodzi wyładowanie. Śladowe ilości domieszek mogą w istotny sposób wpłynąć na pracę urządzenia plazmowego i zmienić sprawność przeprowadzanych procesów plazmochemicznych. Dodawanie argonu do gazu poddawanej obróbce korzystnie wpływa na stabilizację wyładowania oraz pozwala przekazać większą moc z układu zasilania.

### 7.3.2. Wyniki diagnostyki spektroskopowej

Z punktu widzenia spektroskopowej analizy w odniesieniu do omieniowania bardzo istotny jest skład chemiczny materiału elektrod (obecność w widmie linii metali). W badanym reaktorze plazmowym trzy elektrody robocze, pomiędzy którymi rozwija się wyładowanie poślizgowe, wykonane zostały z nierdzewnej stali kwasoodpornej o oznaczeniu 0H18N9, której skład chemiczny podany jest w tabeli 7.2. Elektroda zapłonowa wykonana jest z wolframu.

Tabela 7.2. Skład chemiczny materiału elektrod (stal kwasoodporna 0H18N9)

| Skład chemiczny, % |       |      |       |       |           |           |
|--------------------|-------|------|-------|-------|-----------|-----------|
| C                  | Si    | Mn   | P     | S     | Cr        | Ni        |
| ≤0,07              | ≤0,80 | ≤2,0 | 0,045 | 0,030 | 17,0-19,0 | 9,00-11,0 |

Pomiary spektroskopowe wykonano dla różnych gazów procesowych – argonu, azotu i powietrza przy różnych wartościach przepływu – 0,3 m<sup>3</sup>/h, 0,5 m<sup>3</sup>/h, 1,0 m<sup>3</sup>/h, 1,5 m<sup>3</sup>/h, 2,0 m<sup>3</sup>/h i 3,5 m<sup>3</sup>/h.

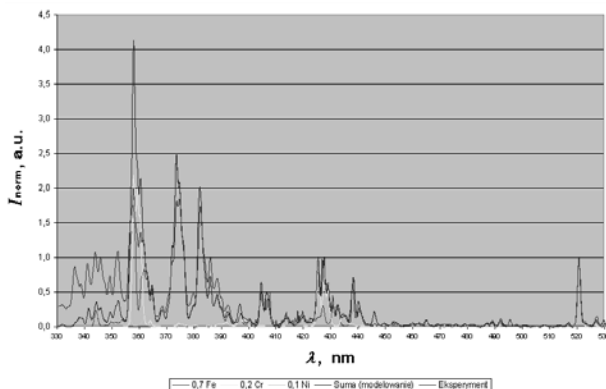
Ze względu na czas rejestracji jednego widma – od 7 ms do 70 ms następuje uśrednianie wyników. W wyniku tego uśredniania, w trakcie obserwacji widma podczas ciągłej rejestracji, nie występują zmiany amplitudy obserwowanych linii widmowych, natomiast amplituda tych linii ulega zmianie przy zmianie napięcia zasilającego. Dodatkowo, w celu wyeliminowania rejestracji obszarów niewypełnionych wyładowaniem, wyniki pomiarów dla każdego z punktów pomiarowych są uśredniane. Uzyskane w ten sposób uśrednione widmo jest porównywane z widmem modelowanym w celu określenia temperatury.

Na podstawie otrzymanych spektrów promieniowania stwierdzono w paśmie 330 nm – 600 nm dużą zawartość linii emisyjnych odpowiadających metalom (chrom, żelazo, nikiel). Duża zawartość metali jest charakterystyczna dla wyładowań łukowych z prądem powyżej 1 A. Proporcje zawartości poszczególnych metali podano w tabeli 7.3.

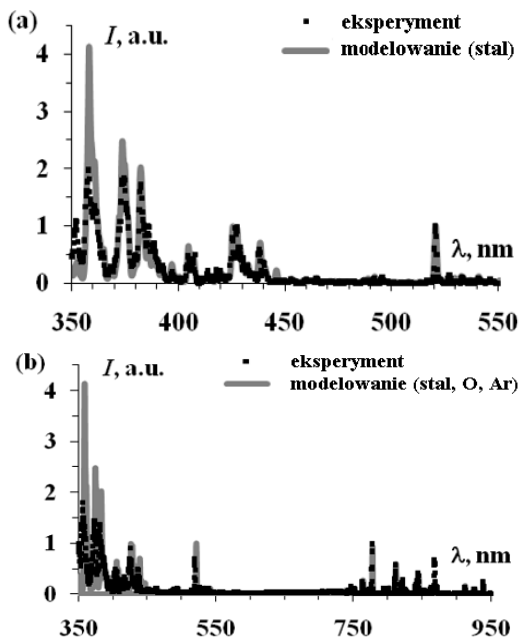
Tabela 7.3. Względna zawartość metali w widmie promieniowania

| Metal:     | Fe  | Cr  | Ni  | Σ |
|------------|-----|-----|-----|---|
| Zawartość: | 0,7 | 0,2 | 0,1 | 1 |

Na podstawie modelowania numerycznego odtworzono rzeczywiste spektrum promieniowania (rysunek 7.29) z dokładnością do 0,1 nm.

Rys. 7.29. Wyniki modelowania spektrum (przepływ 3,5 m<sup>3</sup>/h, gaz roboczy – powietrze)

Rozbieżność wymodelowanych intensywności sumarycznych o największej wartości z danymi uzyskanymi drogą pomiarową spowodowana jest dużą reabsorbcją, wpływu której nie uwzględnia się przy modelowaniu. Do wyznaczenia temperatury obsadzenia wzbudzonych poziomów elektronowych ( $T_e$ ) oraz bezwzględnych wartości koncentracji, skorzystano z bezpłatnie dostępnej bazy SPECAIR [6], zawierającej dane dla plazmy powietrznej ciśnienia atmosferycznego, znajdującej się w lokalnej równowadze termodynamicznej (z ang. LTE air plasma). Dla ślizgającego się wyładowania łukowego w powietrzu o przepływie  $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$  przy ciśnieniu atmosferycznym (1 atm), otrzymano wartość temperatury obsadzenia wzbudzonych poziomów elektronowych  $T_e$  w granicach 7000 K – 9000 K (rysunek 7.30).



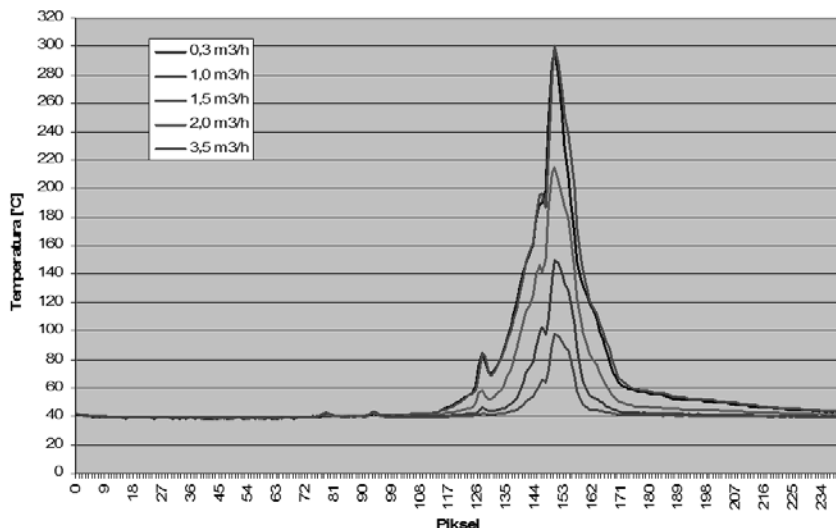
Rys. 7.30. Wyniki modelowania spektrum  $T_e(\text{Fe, Cr, Ni}) = 8\,000 \text{ K}$ ;  $T_e(\text{Ar}) = 7000 \text{ K}$ ;  $T_e(\text{O}) = 6000 \text{ K}$

Otrzymana temperatura obsadzenia wzbudzonych poziomów elektronowych ( $T_e$ ) została wyznaczona z dokładnością 500 K. Celem pomiarów nie było osiągnięcie jak najwyższej dokładności, a jedynie wykazanie, że generowana w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, plazma jest nierównowagowa ( $T_e \gg T_g$ ). W dalszej części rozprawy wyznaczona została temperatura gazu roboczego ( $T_g$ ) wewnątrz komory wyładowczej. Różnica tych temperatur pozwoliła określić stopień nierównowagi plazmy, generowanej w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

### 7.3.3. Wyniki diagnostyki termowizyjnej

Analizę rozkładu temperatury wewnątrz komory wyladowczej w zależności od stosowanego gazu roboczego oraz prędkości jego przepływu przeprowadzono na podłożu w ynikach z yskanych z pom iarów przeprowadzonych za pomocą kamery termowizyjnej V-20 firmy Vigo System.

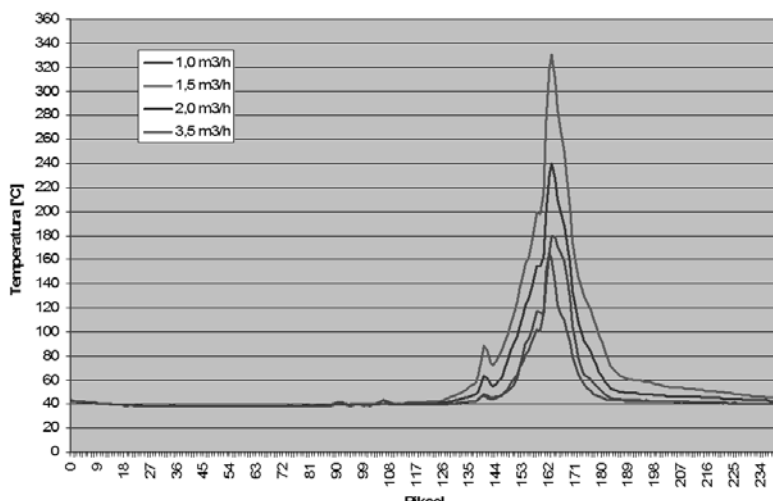
Na r ysunku 7.31. przedstawiono wpływ zmiany wartości przepływu argonu na rozkład temperatury wewnątrz komory wyladowczej reaktora plazmowego.



Rys. 7.31. Wpływ zmiany wartości przepływu argonu na rozkład temperatury wewnątrz komory wyladowczej reaktora plazmowego (poziome ustawienie kamery)

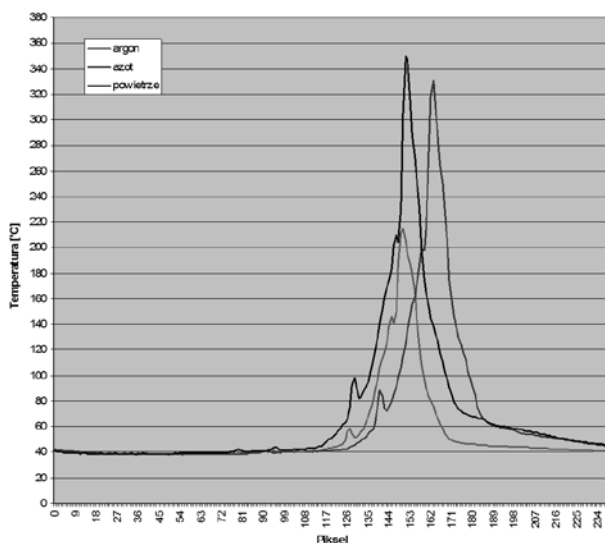
Z przedstawionych wykresów wynika, iż wraz ze wzrostem wartości przepływu argonu przez komorę wyladowczą reaktora plazmowego maleje temperatura wewnątrz komory wyladowczej. Przy czym przy małych wartościach przepływu (do  $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ) zmiany temperatury są nieznaczne – zmiana wartości przepływu w zakresie od  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$  do  $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$  powoduje zmianę temperatury o ok. 10%. Zwiększenie wartości przepływu powyżej  $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$  powoduje znaczący spadek temperatury wewnątrz komory wyladowczej reaktora.

Na rysunku 7.32 przedstawiono wpływ zmiany wartości przepływu azotu na rozkład temperatury wewnątrz komory wyladowczej reaktora plazmowego. W przypadku przepływu azotu przez komorę wyladowczą reaktora plazmowego, największą temperaturę możemy zaobserwować przy przepływach w granicach od  $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$  do  $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ . Przy większych przepływach temperatura wewnątrz komory wyladowczej maleje. Charakterystyczne jest także, iż przy skrajnych wartościach przepływu ( $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) obserwujemy najniższą temperaturę wewnątrz komory wyladowczej.



Rys. V.32. Wpływ zmiany wartości przepływu azotu na rozkład temperatury wewnątrz komory wyladowczej reaktora plazmowego (poziome ustawienie kamery)

Na rysunku 7.33 przedstawiono wpływ rodzaju gazu roboczego na rozkład temperatury wewnątrz komory wyladowczej reaktora plazmowego przy stałej wartości przepływu wynoszącej  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Rys. 7.33. Wpływ gazu roboczego na rozkład temperatury wewnątrz komory wyladowczej reaktora plazmowego przy stałej wartości przepływu  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$  (poziome ustawienie kamery)

Wraz ze wzrostem wartości przepływu gazu roboczego przez komorę wyladowczą reaktora rośnie wpływ składu chemicznego gazu roboczego na rozkład temperatury wewnątrz komory wyladowczej. W przypadku stosowania azotu lub powietrza jako gazu roboczego uzyskujemy temperaturę wewnątrz komory wyladowczej o ok. 30% większą w porównaniu do temperatury uzyskanej w przypadku zastosowania argonu. Różnica temperatur wynikająca ze stosowania azotu lub powietrza jako gazu roboczego nie przekracza 10%, co związane jest z dużą zawartością azotu w powietrzu.

#### **7.4. Podsumowanie**

Prowadzenie dowolnego procesu wykorzystującego plazmę, powinno być oparte na znajomości jej właściwości oraz opanowaniu metod jej otrzymywania. Plazmy nie da się magazynować i transportować, zatem musi być wytwarzana w miejscu, w którym jest wykorzystywana w procesie technologicznym. Większość badań nad plazmą koncentruje się wokół uzyskania kontrolowanych reakcji chemicznych z jej udziałem. Od stałości parametrów generowanej plazmy w dużym stopniu zależy powtarzalność prowadzonych procesów plazmochemicznych. Parametry plazmy niezbędne dla poprawnego przebiegu reakcji uzyskuje się poprzez kontrolowanie warunków, w jakich pali się wyladowanie, tj. składu chemicznego gazu plazmotwórczego, jego temperatury, ciśnienia i wilgotności oraz poprzez kontrolowanie parametrów materiału poddawanego obróbce plazmowej. Równie ważny dla generowania plazmy o odpowiednich parametrach ma prawidłowo dobrany układ zasilania.

Badania nad poprawą jakości parametrów fizycznych plazmy są bardzo kosztowne. Budowa nowych, czy modyfikacja istniejących stanowisk laboratoryjnych zajmuje dużo czasu, odsuwając termin uzyskiwanych wyników, pochłaniając jednocześnie znaczne sumy pieniędzy. Opracowanie metod pozwalających przeprowadzić ocenę parametrów wytwarzanej plazmy dla zastosowań w procesach przemysłowych jest ważnym zagadnieniem, które pozwoli odpowiednio projektować reaktory plazmowe i ich systemy zasilania. Wykorzystanie badań eksperymentalnych połączonych z analizą komputerową prowadzi do obniżenia nakładów finansowych oraz skrócenia czasu wprowadzania zmian do badanego układu.

Na potrzeby analizy wpływu poszczególnych parametrów układu zasilania, gazu procesowego oraz geometrii reaktora na wartość długości krytycznej, został opracowany model numeryczny. Z przeprowadzonej analizy numerycznej wynika, iż czas krytyczny jest liniowo zależny od reaktancji wewnętrznej, a więc należy zapewnić możliwie niską jej wartość. Z drugiej strony, z badań eksperymentalnych wynika, iż mała wartość reaktancji wewnętrznej prowadzi do występowania przerw bezprądowych i niestabilności wyladowania. Zatem dobór wartości reaktancji wewnętrznej jest jednym z istotnych zadań przy projektowaniu układów zasilania reaktorów ze ślizgającym się wyladowaniem łukowym.

Wzrost wartości maksymalnej prądu powoduje wydłużenie czasu krytycznego, a więc istotne jest zapewnienie wysokiego napięcia niezbędnego do zapłonu i rozwoju wyladowania i ograniczenie wartości maksymalnej prądu.

Ograniczenie prądu powoduje zmniejszenie mocy dostarczanej do wyładowania, a jego zwiększenie prowadzi do równowagi termodynamicznej, dlatego dobór właściwej wartości prądu powinien uwzględniać specyfikę procesów plazmowych przeprowadzanych z wykorzystaniem reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Prędkość przepływu gazu przez komorę wyładowczą zależy od konkretnego zastosowania reaktora. Należy brać pod uwagę, iż wzrost prędkości przepływu pozwala skrócić czas, po jakim zapewnione zostaną nierównowagowe warunki generacji plazmy nietermicznej. Zwiększenie kąta rozchylenia elektrod roboczych powoduje skrócenie czasu krytycznego. Należy jednak pamiętać, iż spowoduje to także skrócenie czasu trwania cyklu pracy reaktora, przez co zmniejszeniu ulega obszar komory wyładowczej wypełnionej plazmą nierównowagową.

Przedstawiony został także model numeryczny bazujący na równaniach zachowania masy, pędu i energii pozwalający na wyznaczenie rozkładu temperatury. Z wyników symulacji wynika, że największą temperaturę obserwujemy przy elektrodzie, obok dyszy wlotowej gazu. W pobliżu ścianek zewnętrznych komory wyładowczej wartość temperatury zbliża się do temperatury otoczenia. Wzdłuż osi symetrii, obserwujemy spadek temperatury do wartości 450 – 550 K oraz brak zmiany temperatury wraz z oddalaniem się od dyszy wlotowej. Mimo zaniechania w obliczeniach prędkości promieniowej gazu, obserwujemy znaczące zmiany temperatury wraz z oddalaniem się od środka (osi symetrii) komory wyładowczej. Taki rozkład temperatury wewnątrz komory wyładowczej spowodowany jest poczynionymi w modelu uproszczeniami, z których największy wpływ ma założenie laminarnego przepływu gazu, co w warunkach praktycznych jest trudne do spełnienia.

Spektroskopowe metody pomiaru temperatury zostały użyte do określenia temperatury elektronowej. Dla tych metod skorzystać można z dobrze opracowanej metodologii wykonywania pomiarów. Dokładność pomiarów jest wysoka i ograniczona jedynie przez parametry stosowanego spektrometru optycznego. Natomiast, największą trudność sprawia właściwa interpretacja otrzymanych widm promieniowania. Spowodowane jest to nakładaniem się linii widmowych i ograniczoną zdolnością rozdzielczą użytego spektrometru.

Wynikiem pomiaru przy stosowaniu metod termowizyjnych, w odróżnieniu od metod spektroskopowych (bezpośredni wynik pomiaru – widmo promieniowania), jest rozkład temperatury badanego obiektu. Należy jednak zwracać uwagę na błędy związane z niewłaściwym stosowaniem i ustawieniem kamery termowizyjnej względem badanego obiektu (ograniczona głębokość ostrości).

Stosując metody spektroskopowe, dla ślizgającego się wyładowania łukowego w powietrzu o przepływie  $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$  przy ciśnieniu atmosferycznym, otrzymano wartość temperatury obsadzenia wzbudzonych poziomów elektronowych  $T_e$  w granicach 7000 K – 9000 K. Natomiast na podstawie pomiarów termowizyjnych określona została temperatura gazu roboczego  $T_g$  wewnątrz komory wyładowczej na poziomie 300 K – 500 K. Różnica tych temperatur wskazuje na wysoki stopień nierównowagi plazmy generowanej w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

## 7.5. Literatura

- [1] Jaroszyński L., Analiza plazmowego reaktora łukowego wykorzystującego nieliniowość magnetowodów transformatorów układu zasilającego, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin, 2000
- [2] Jaroszyński L., Stryczewska H.D.: "The Numerical Model of the Gliding Arc Discharge" II International Symposium: New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation, Kazimierz Dolny, February, 14-17, 2001, pp. 114-117
- [3] Janowski T., Jaroszyński L., Stryczewska H.D.: "Modification of the Mayr's Electric Arc Model for Gliding Arc Analysis" XXVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Nagoya, Japan, July, 17-22, 2001, pp. 341-342
- [4] Komarzyniec G., Stryczewska H.D., Diatczyk J.: Wpływ parametrów źródła zasilającego na charakterystyki reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem elektrycznym, Przegląd Elektrotechniczny, 7/2008, 60-63
- [5] Stryczewska H.D., Diatczyk J., Komarzyniec G.: Technologiczne charakterystyki ślizgającego się wyładowania łukowego, Przegląd Elektrotechniczny, 7/2008, 170-173
- [6] SPECAIR, <http://www.specair-radiation.net>
- [7] Janowski T., Jaroszyński L., Stryczewska H.D.: "Modeling of the Ignition Voltage in a Gliding Discharge Power System Based of Non-linear Transformers" XI International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering ISEF, Kraków, September, 20-22, 2001, pp. 447-450
- [8] Stryczewska H.D., Jaroszyński L.: „Modelling of the Gliding Arc Discharges Applied in Technologies of Environment Protection” Polish Journal of Chemical Technology, Szczecin, 2002, str. 36-41
- [9] Stryczewska H.D., Diatczyk J.: „Numerical Model of Temperature Distribution for Plasma Arc” 4th International Conference: Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection - ELMECO-4, Nałęczów, Poland, September 21-24 2003, pp 89-94
- [10] Diatczyk J., Stryczewska H.D., Komarzyniec G.: „Modelling of Plasma Temperature Distribution” International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Nałęczów – Poland, 4 – 7 September 2005, str. 31
- [11] Diatczyk J., Stryczewska H.D., Komarzyniec G., Modeling of the Temperature Distribution in Arc Discharge Plasma Reactor, Journal of Advanced Oxidation Technologies, Vol. 9, no 2, July 31, 2006, pp. 174-177
- [12] Diatczyk J., Badanie pola temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2009
- [13] Stryczewska H.D., Elektromagnetyczny układ zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, Politechnika Lubelska, seria Elektryka, Wydawnictwa Uczelniane, s. 146, 1998



## **8. BADANIA KOMPATYBILNOŚCI URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH**

### **8.1. Wstęp**

Wejście Polski do Unii Europejskiej oraz konsekwencje wynikające z przyjęcia obowiązujących w niej przepisów prawnych, spowodowały znaczący wzrost zainteresowania problematyką kompatybilności elektromagnetycznej (EMC). Tematyka ta stanowi również przedmiot badań w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii w Politechnice Lubelskiej. Istnieje szereg środków ochrony przed zaburzeniami elektromagnetycznymi. Jednym ze sposobów tłumienia zakłóceń występujących w sieciach elektrycznych jest zastosowanie filtrów kompatybilnościowych. Są to układy bazujące na elementach pojemnościowych i dławikach indukcyjnych. W tych ostatnich szczególną rolę odgrywają nowoczesne materiały magnetycznie miękkie, o specjalnie dobranych parametrach fizycznych. Dzięki nim można realizować układy osiągające wartości tłumienności wtrąceniowej rzędu kilkudziesięciu decybeli. W IPEiE wykonano szereg pomiarów laboratoryjnych oraz obliczeń prowadzących do stworzenia kryteriów przydatności materiałów magnetycznych na rdzenie dławików przeciwzakłóceńowych. Niniejszy rozdział poświęcony jest opisowi metod i badań kompatybilnościowych możliwych do przeprowadzenia w instytutowym Laboratorium EMC. Ponadto zawiera informacje dotyczące aktualnych wymagań w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej dla wyrobów elektrycznych w postaci głównych aktów prawnych, procedur oceny zgodności wyrobów i związanej z nimi dokumentacją oraz zasadami przeprowadzania kontroli. Praktyczną informacją jest skomentowany wykaz najczęściej popełnianych błędów w ocenie zgodności EMC.

### **8.2. *Pomiary laboratoryjne kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektrycznych***

#### **8.2.1. Pojęcia wstępne**

Wymiernym efektem dynamicznego rozwoju technicznego we wszystkich gałęziach energetyki, informatyki, łączności i radiokomunikacji jest wzrost liczby urządzeń i systemów przetwarzających i emitujących energię elektryczną. Zapewnienie możliwości niezakłóconej jednoczesnej pracy tak wielu różnych urządzeń i systemów warunkuje dalszy rozwój cywilizacji.

Urządzenia elektryczne i elektroniczne w czasie pracy emitują zaburzenia elektromagnetyczne, które możemy podzielić na zaburzenia niskiej i wysokiej częstotliwości oraz zaburzenia propagowane przewodowo lub promieniowo. Najczęściej są to zjawiska niepożądane, chociaż są maszyny i urządzenia, w których wykorzystuje się celowo pola i promieniowanie elektromagnetyczne (np. telefonia komórkowa). Dodatkowo każde z otaczających nas urządzeń elektrycznych w mniejszym lub większym stopniu jest zarówno nadajnikiem zaburzeń generowanych do środowiska, jak również jest odbiornikiem sygnałów zakłócających [1-10].

Oddziaływanie zaburzeń elektromagnetycznych może być różne i może

prorowadzić do poważnych zagrożeń. Zaburzeń nie da się całkowicie wyeliminować, należy jednak wykorzystać techniki i środki redukujące ich wielkość do akceptowalnego poziomu.

Aby zapobiegać niebezpiecznym sytuacjom, każde urządzenie czy system, w którym znajdują się elementy elektryczne i elektroniczne, powinno być tak skonstruowane, aby emitować jak najmniej zaburzeń. Ponadto każde urządzenie czy maszyna powinno być tak skonstruowane, aby było maksymalnie odporne na zaburzenia emitowane przez inne urządzenia. Ta zdolność współistnienia obok siebie różnych urządzeń i możliwość poprawnej pracy nazywana jest *kompatybilnością elektromagnetyczną*<sup>1</sup>. Osiąga się to przez odpowiednią konstrukcję, dobór elementów, połączenia, filtrowanie i ekranowanie. Przy dzisiejszym stopniu skomplikowania układów często nie wystarczy wiedza teoretyczna, musi być ona podparta specjalnymi badaniami. Pomiary dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń technicznych są jednym z podstawowych elementów tego procesu i stanowi niepodważalne źródło informacji o rzeczywistych właściwościach badanego urządzenia. Realizując takie pomiary, należy pamiętać o specyficznych wymaganiach stosowanych metod pomiarowych, używanych przyrządów i właściwościach fizycznych sygnałów oraz pól elektromagnetycznych, mając na uwadze ich "szerokopasmowość" i duży zakres dynamiki mierzonych wartości. Ilościowe, czasochłonne pomiary kontrolne można w przypadku testów wstępnych na poszczególnych etapach konstrukcji zastąpić testami jakościowymi. Te ostatnie są prostsze w realizacji i znacznie tańsze ze względu na mniejsze wymagania aparaturowe, uboższe zaplecze pomiarowe i mniejszą czasochłonność [1-10].

Działające przy Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Informatyki Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej jest zlokalizowane w budynku Centrum Doskonałości Zastosowań Technologii Nadprzewodnikowych i Plazmowych w Energetyce – ASPPECT. Wnętrze pomieszczenia jest zabezpieczone przed emisją pola elektromagnetycznego poprzez ekran z metalowej i uziemionej siatki umieszczonej w ścianach, suficie oraz przy oknach. Całość systemu zabezpieczającego tworzy tzw. klatkę Faradaya, skutecznie zmniejszającą tło elektromagnetyczne. Modernizowane przez kilka ostatnich lat własne zaplecze pomiarowe umożliwia realizację wielu testów wstępnych, zgodnych z wymaganiami „EMC precompliance”. Aktualne informacje o prowadzonych badaniach i posiadanym wyposażeniu są zamieszczone na stronie internetowej laboratorium kompatybilności <http://emc.pollub.pl>.

### 8.2.2. Zagadnienie prawne

Wejście Polski do Unii Europejskiej oraz konsekwencje wynikające z przyjęcia obowiązujących w niej przepisów prawnych, spowodowały również znaczący wzrost zainteresowania problematyką kompatybilności

---

<sup>1</sup> Zgodnie z obowiązującą dyrektywą kompatybilnościową: *kompatybilność elektromagnetyczna* (ang. electromagnetic compatibility, EMC) to zdolność aparatu, instalacji lub systemu do zadowalającej pracy w elektromagnetycznym środowisku bez równoczesnego wywoływania zakłóceń elektromagnetycznych, które byłyby nieakceptowane przez wszystkie istniejące w tym środowisku aparaty, instalacje lub systemy.

elektromagnetycznej.

Najważniejszym impulsem dla rozwoju całej dziedziny kompatybilności elektromagnetycznej było wprowadzenie w państwach UE Dyrektywy 89/336/EEC. Dyrektywa ta zaczęła obowiązywać od 01.01.1996 r. i była jedną z tzw. Dyrektyw Nowego Podejścia. Spełnienie jej wymagań oraz wymagań Norm Zharmonizowanych powiązanych z tą Dyrektywą stało się jedyną drogą uzyskania znaku CE, uprawniającego do wprowadzenia każdego elektrycznego produktu na rynek Unii Europejskiej. Postępujący przez prawie 20 lat rozwój techniczny oraz ciągłe zmiany regulacyjne wprowadzane przez Komisję Europejską wymusiły zmiany w obowiązującej dyrektywie. Prace te zakończyły się przyjęciem przez Parlament Europejski i Radę Europy nowej Dyrektywy 2004/108/EC (jednocześnie uchylającej Dyrektywę 89/336/EC). Nowa Dyrektywa została opublikowana 31 grudnia 2004 r. w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej i 20 stycznia 2005 r. weszła w życie. Stosowanie przepisów odnoszących się do nowej Dyrektywy nastąpiło od 20 lipca 2007 r.

Nowa Dyrektywa EMC w stosunku do poprzedniej precyzyjniej zdefiniowała zakres i przedmiot jej stosowania, zmniejszyła do dwóch liczbę procedur oceny zgodności i pozostawiła producentowi wybór jednej z nich. Ponadto zdefiniowała aparaturę i instalacje stacjonarne oraz jednoznacznie określiła normy zharmonizowane. Dyrektywa wprowadziła również domniemanie zgodności z wymaganiami zasadniczymi (kiedy spełniały wymagania określone w stosownych normach zharmonizowanych). Ponadto nowa dyrektywa szczegółowiej określiła, jak powinno być oznakowane urządzenie spełniające wymagania zasadnicze w zakresie EMC, jakie elementy powinna zawierać dokumentacja techniczna i deklaracja zgodności.

Graniczne poziomy zaburzeń, jakie dane urządzenia mogą emitować do środowiska w jakim pracują oraz na ile dane urządzenia powinny być odporne na zaburzenia emitowane przez inne urządzenia, określają normy.

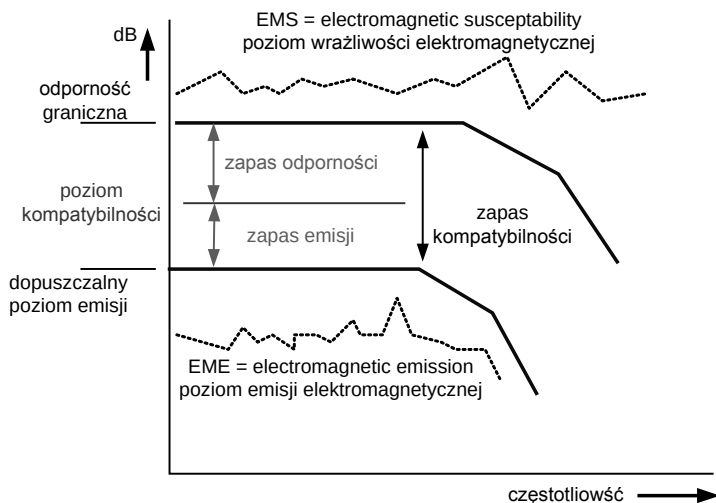
Normy dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej można podzielić na normy ogólne, np. seria norm EN 61000-6, dotyczą odporności na zaburzenia elektromagnetyczne urządzeń pracujących w różnych środowiskach oraz PN-EN 61000-3 i PN-EN 61000-6-4, które dotyczą dopuszczalnych poziomów emitowanych zaburzeń przewodzonych i wypromieniowywanych. Dla niektórych grup wyrobów opracowano normy szczegółowe, które określają dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń i wymaganą odporność na zaburzenia a także to, jakie rodzaje badań są wymagane ze względu na konstrukcję danego urządzenia. Przykładem takich norm są EN 55014-1, norma dotycząca emisji zaburzeń dla przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń czy norma EN 55014-2 dotycząca odporności na zaburzenia dla urządzeń wymienionych powyżej [12,14-27, 34,35].

### **8.2.3. Badania i analizy kompatybilności elektromagnetycznej**

Ze względu na powszechność i ciągle rosnącą rolę sprzętu elektrycznego i elektronicznego oraz ze względu na wymagania prawne, istnieje potrzeba badania odporności i emisyjności w sensie elektromagnetycznym, a w ich następstwie wyznaczania specjalnych poziomów kompatybilności badanego sprzętu.

Istnieją kryteria określające poziomy odporności, emisyjności i kompatybilności urządzenia. W pierwszej kolejności należy zdefiniować odporność i emisję analizowanego obiektu. Odpornością elektromagnetyczną na zaburzenia elektromagnetyczne definiujemy taką właściwość urządzenia lub systemu, która charakteryzuje zdolność do jego poprawnego działania bez obniżenia jakości w obecności zaburzenia elektromagnetycznego. Natomiast poprzez emisję elektromagnetyczną rozumiemy energię elektromagnetyczną przedostającą się do otaczającego środowiska na skutek promieniowania elektromagnetycznego w wolnej przestrzeni, przewodzenia przez przewody zasilające lub sygnałowe, sprzężenia pojemnościowego i sprzężenia indukcyjnego [1,3-6].

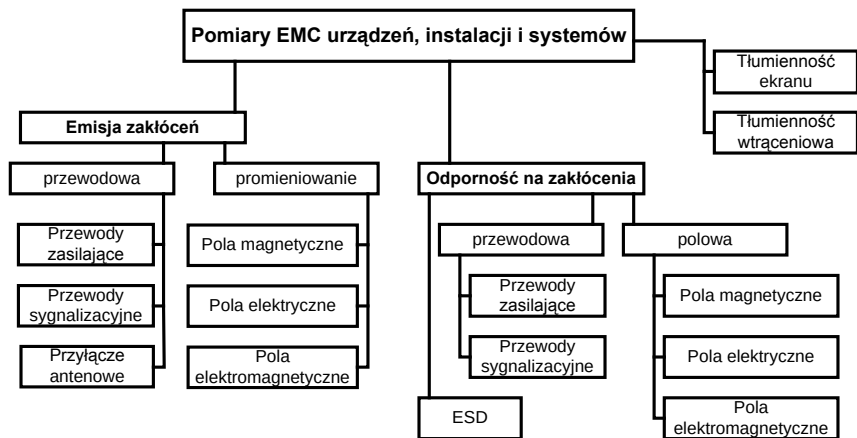
Poziom kompatybilności jest to największy poziom zakłóceń danego rodzaju, który zgodnie z oczekiwaniami może działać na urządzenie pracujące poprawnie w danych warunkach. Dla systemu lub instalacji poziom kompatybilności uzgadnia się jako poziom zakłóceń dla którego prawdopodobieństwo wystąpienia wrażliwości zespołu na zakłócenia oraz prawdopodobieństwo wystąpienia emisji zaburzeń o tym poziomie, nie przekraczają wartości dopuszczalnej prawdopodobieństwa wystąpienia zaburzeń. W niektórych przypadkach normy określają poziomy kompatybilności. Graficzne relacje występujących w analizie EMC poziomów kompatybilności, odporności i emisyjności prezentuje rysunek 8.2.1.



Rys. 8.2.1. Wzajemne relacje między poziomami kompatybilności, emisji i odporności urządzenia elektrycznego

Określenie wszystkich poziomów jest możliwe dzięki wynikom przeprowadzonych symulacji i badań testowych. Pełna ocena jakości urządzenia z punktu widzenia zaleceń EMC wymaga wykonania w specjalistycznym

laboratorium wielu testów kontrolnych. Diagram klasyfikujący pomiary powiązane z kompatybilnością elektromagnetyczną prezentuje rysunek 8.2.2. I tak w przypadku oceny emisyjności są mierzone poziomy emisji sygnałów promieniowanych i przewodzonych. Pomiary podatności pozwalają natomiast ustalić parametry i sprawdzić jakość pracy w trakcie narażania urządzenia sygnałami i polami testującymi oraz wyładowaniami elektrostatycznymi. Powiązane z kompatybilnością są również pomiary i symulacje dotyczące technik poprawy poziomów kompatybilności. Do podstawowych należą zagadnienia z zakresu ekranowania i filtrowania.

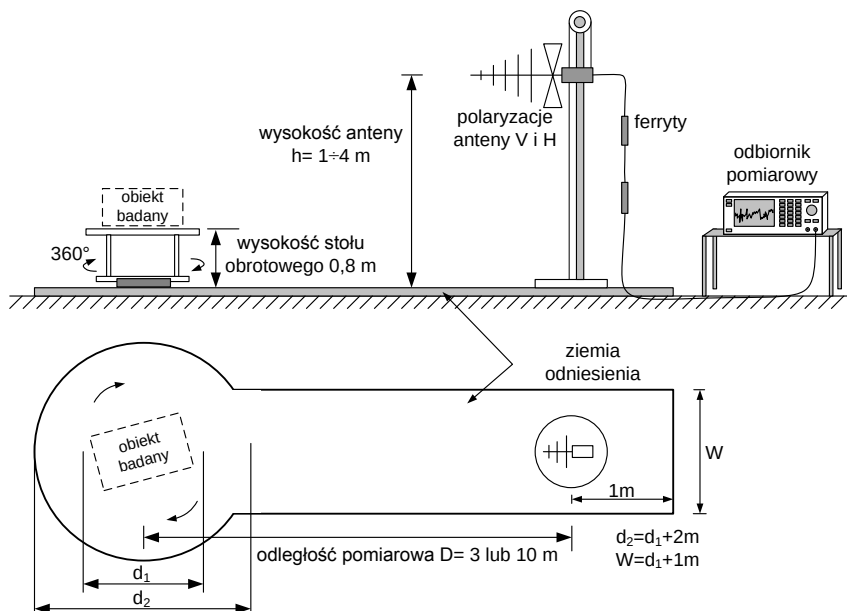


Rys.8.2.2. Klasyfikacja pomiarów dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej

### 8.2.8.1. Metody badań emisyjności promieniowanej urządzeń

Pomiary emisyjności promieniowanej stanowią jedno z trudniejszych i bardziej kosztownych badań, ponieważ wymagają odpowiednio dużego stanowiska pomiarowego o dostatecznie niskim poziomie zaburzeń promieniowanych obcych, pochodzących od innych źródeł. We współczesnym otaczającym nas środowisku elektromagnetycznym zwykle istnieje wiele pożądaných i niepożądanych źródeł promieniowania, które w znacznym stopniu utrudniają wykonywanie pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego [3-6,10].

Zalecenia większości norm dotyczących emisyjności urządzeń zakładają, że pomiary emisyjności promieniowanej powinny być przeprowadzane na odpowiednim stanowisku pomiarowym tzw. otwartym poligonie pomiarowym (ang. OATS Open Area Test Site). Zasadniczym elementem otwartego poligonu pomiarowego jest płaszczyzna odniesienia (tzw. ziemia odniesienia) w postaci odpowiednio ukształtowanej i uziemionej płyty metalowej. Przykładowe rozmieszczenie elementów stanowiska pomiarowego do emisyjności promieniowanej pokazano na poniższym rysunku [7,10,36,37].



Rys.8.2.3. Stanowisko pomiarowe do badań emisji elektromagnetycznej, rzut odniesiony do geometrii poligonu pomiarowego

Prowadzenie badań w terenie otwartym zazwyczaj jest utrudnione ze względu na np. warunki pogodowe wpływające również na propagację fal elektromagnetycznych. Wykorzystuje się więc inne, alternatywne metody, a jedną z bardziej znanych jest prowadzenie badań w ekranowanych komorach bezodbiciowych (ang. anechoic and shielded chamber), które pozwalają na uniezależnienie się od warunków klimatycznych jak i elektromagnetycznych.

Komory bezodbiciowe są zazwyczaj pomieszczeniami w kształcie prostopadłościanu wyposażonymi w ekrany ograniczające wpływ zewnętrznych pól elektromagnetycznych pochodzących ze środowiska elektromagnetycznego oraz wewnętrzne powłoki pochłaniające energię promieniowania wytwarzanego wewnątrz komory w celu uniknięcia odbić fal elektromagnetycznych i wycieków emisji na zewnątrz. Przy zachowaniu odpowiedniego poziomu skuteczności ekranowania oraz pochłaniania fal przez tzw. absorbery możliwe jest uzyskanie pewnej przestrzeni pomiarowej o znanych i kontrolowanych warunkach propagacji fal elektromagnetycznych. Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej instytutu IPEiE posiada ekranowaną komorę akustyczną. Ze względu na jej stałą konstrukcję posiada właściwości ekranujące pole elektryczne i magnetyczne, utożsamiane z parametrami klatki Faradaya. Komorę oraz jej wnętrze przedstawiają poniższe zdjęcia.

Pomiary emisji zakłóceń służą ustaleniu zdolności urządzenia elektrycznego do emisji zakłóceń w znormalizowanych warunkach, aby móc

porównać uzyskane wyniki pomiarów z dopuszczalnymi poziomami granicznymi.

Zakłócenia (zaburzenia) elektromagnetyczne w pasmie częstotliwości od kilkudziesięciu kHz do kilku GHz są określane jako zakłócenia (zaburzenia) radioelektryczne (RFI - Radio Frequency Interference). Najczęściej zakłócenia te są efektem ubocznym, wytwarzanym w sposób niezamierzony podczas realizacji podstawowych funkcji urządzenia (lub systemu). Powstają one w obwodach elektrycznych zawierających indukcyjności i pojemności (nawet, kiedy występują w postaci parametrów pasożytniczych), w których mają miejsce nagłe zmiany przepływającego prądu, zmiany napięcia elektrycznego, sprzężenia zwrotne. Generacja i rozkład energii zakłóceń w widmie częstotliwości oraz charakterystyki czasowe są zależne od struktury i parametrów elektrycznych urządzenia w zakresie wielkiej częstotliwości, jego charakterystyk czasowych oraz impedancji obciążającej źródło. Biorąc pod uwagę charakterystyki czasowe emisji pożądanej i niepożądanej oraz zakłóceń przewodzonych do środowiska, zakłócenia generowane przez dowolne źródła można podzielić na ciągłe i krótkotrwałe, natomiast ze względu na charakterystyki częstotliwościowe zakłócenia można podzielić na: wąskopasmowe i szerokopasmowe.

Klasyczne pomiary promieniowania wykonuje się w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 1000 MHz, stosując miernik zakłóceń z detektorem wartości quasi-szczytowej lub średniej. Miernik zakłóceń powinien spełniać wymagania określone w publikacji 16 CISPR. Instytut posiada odbiornik pomiarowy ESCI3 firmy Rodhe&Schwarz. W zależności od relacji odległości pomiary realizujemy w polu bliskim lub dalekim. Wymaga to wykorzystania różnych dodatkowych akcesoriów pomiarowych. W przypadku pomiarów w polu dalekim wykorzystywany jest system anten pomiarowych – zamontowanych na maszcie, dla pola bliskiego wykorzystywany jest układ sond pola bliskiego dla składowej magnetycznej i elektrycznej.

Pomiary natężenia promieniowanego pola elektromagnetycznego należy wykonywać anteną umieszczaną w ściśle określonej odległości, mierzonej w płaszczyźnie poziomej od granicy umowną linią prostą, poprowadzoną wzdłuż prostego, geometrycznego obrysu, obejmującego badane urządzenie. Jeśli z powodu zbyt wysokiego poziomu tła zakłóceń lub z innych przyczyn nie można wykonywać pomiarów w odległości 10 m, to dla urządzeń klasy B można je przeprowadzić w odległości 3 m. W celu uzyskania zgodności wyników z pomiarem w znormalizowanej odległości 10 m należy dokonać odpowiedniego przeliczenia, stosując współczynnik proporcjonalności malejący o 20 dB na dekadę wzrostu odległości pomiarowej. Pomiary sondami wykonujemy w najbliższej odległości od źródła emisji w zakresie mili- i centymetrów. [36,37]

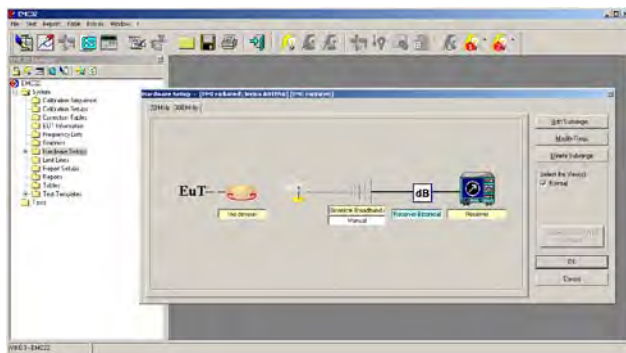
Wraz z aparaturą pomiarową na wyposażeniu instytutowym znajduje się oprogramowanie współpracujące z aparaturą do badań EMC. EMC32 jest oprogramowaniem systemowym do pomiarów EMC w 32 bitowym systemie operacyjnym firmy Microsoft. Zapewnia ono wspólny interfejs użytkownika dla pomiarów emisji zakłóceń - EMI oraz dla pomiarów wrażliwości na zakłócenia - EMS. Łączy wygodę obsługi graficznego interfejsu użytkownika oraz elastyczność zarówno przy wspomaganiu urządzeń pomiarowych jak i przeprowadzaniu pomiarów EMC.



Rys.8.2.4. Zdjęcia ekranowanej komory akustycznej Instytutu IPEiE, widok na zewnątrz i wewnątrz komory



Rys.8.2.5. Zdjęcia aparatury pomiarowej do badania emisji promieniowanej na wyposażeniu Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej na Politechnice Lubelskiej (zestaw firmy Rohde&Schwarz)



Rys.8.2.6. Przykładowe okno programu EMC32 zarządzające procesem pomiaru emisji elektromagnetycznej



Najważniejszymi modułami oprogramowania są ustawienie sprzętowe oraz szablony testów. Hardware setup oznacza blokowy diagram konfiguracji stosowanego systemu EMI. Tutaj użytkownik definiuje jaki odbiornik pomiarowy i jaka antena są użyte w systemie i w jakim zakresie częstotliwości ma pracować. Także zdefiniowany jest tutaj tor sygnału, czyli sposób połączeń między użytymi urządzeniami. W module test template należy zdefiniować jak i w jakim zakresie częstotliwości ma być mierzona emisja zakłóceń badanego urządzenia oraz ustawienia odbiornika pomiarowego.

#### 8.2.3.2. Metody badań emisyjności przewodzonej urządzeń

Zgodnie z przepisami międzynarodowymi poziom zakłóceń przewodzonych musi być badany w zakresie częstotliwości od 0,009 do 300MHz (w szczególnych przypadkach do 1000MHz). Napięcie zakłóceń mierzy się w zakresie od 9 kHz do 30MHz w  $\mu V$ . Moc zakłóceń w zakresie od 30MHz do 300MHz (w szczególnych przypadkach do 1000MHz) mierzy się w pW. Dla uproszczenia zmierzone napięcia, natężenia pola i moce zakłóceń są wyrażane w decybelach (dB).

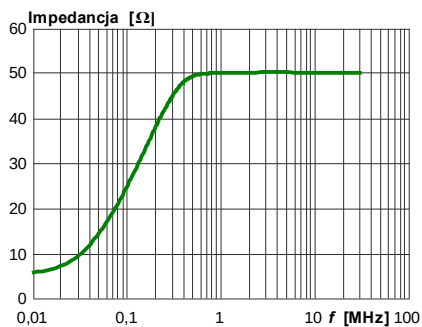
W trakcie pomiaru napięcia zakłócającego generowanego przez obiekt elektryczny, trudno jest określić rezystancję (impedancję) źródła zakłóceń w zakresie wysokich częstotliwości. Dlatego pomiar napięcia może być zdefiniowany tylko wówczas, gdy zostanie zmierzony na określonej rezystancji (impedancji) obciążenia (tzw. zastępczej). Obiekt mierzony zostaje połączony z tzw. siecią sztuczną, która przedstawia sobą dla wielkości zakłócającej zdefiniowaną impedancję obciążenia. [1,3-7,10,30-37]

Sieć sztuczna - LISN (ang. Line Impedance Stabilization Network) stabilizuje warunki pomiarów napięć zakłóceń w obwodzie zasilania testowanego obiektu. Realizuje to poprzez spełnienie następujących funkcji:

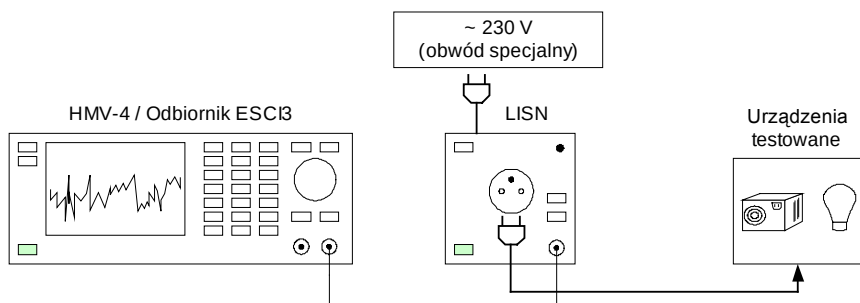
- Obciąża badane źródło impedancją określoną przez normy jako  $50\Omega/50\mu H+5\Omega$ , a spadek napięcia na tej impedancji jest miarą poziomu zakłóceń badanego źródła.
- Izoluje obwód pomiarowy od wpływu przypadkowych zmian impedancji obwodu zewnętrznego oraz od sygnałów w.cz., jakie mogą przenikać z badanego obiektu do sieci i na odwrót z sieci zasilającej do badanego obiektu.
- Umożliwia normalny odbiór prądów roboczych (prąd stały lub prądy małej - np. akustycznej – częstotliwości) w obwodzie testowanego obiektu. Sieci sztuczne przy częstotliwości prądu zasilającego powinny charakteryzować się możliwie jak najmniejszym spadkiem napięcia. W żadnym przypadku napięcie zasilania na zaciskach badanego urządzenia, czy też systemu nie może być niższe niż 95%  $U_{znomionowe}$ .
- Najszerze zastosowanie praktyczne znajdują sieci sztuczne w pomiarach zakłóceń w obwodach zasilania urządzeń elektrycznych. Dla obwodów jednofazowych stosowane są – sieci sztuczne typu „V” , w których impedancje obciążenia włączone są między każdy z przewodów i masę

Pomiary zaburzeń przewodzonych są ukierunkowane, przede wszystkim, na określenie poziomu zaburzeń wprowadzanych przez układy do sieci zasilającej. W przeciwieństwie do pomiarów za pomocą sztucznej sieci (LISN), pomiary w dziedzinie częstotliwości za pomocą sond prądowych lub pojemnościowych mogą być wykonywane w dowolnym punkcie obwodu. Umożliwiają one określenie częstotliwości poszczególnych modów oscylacji w całym zakresie widma, nawet jeśli znacznie różnią się one poziomami. Zaletą pomiarów w dziedzinie czasu jest natomiast to, że pozwalają na bezpośrednie porównanie faz przebiegów, co z kolei umożliwia określenie kierunków przepływu poszczególnych składowych prądów zaburzeń.

Podstawowym, sposobem pomiaru zaburzeń przewodzonych jest pomiar w dziedzinie częstotliwości, przy użyciu sztucznej sieci stabilizującej impedancję (LISN) i odbiornika pomiarowego (schemat na rysunku 8.2.7).



Rys.8.2.7a. Jednofazowa sieć sztuczna Two-line V-Network NNB 41, charakterystyka impedancyjna sieci sztucznej zgodnej z wymaganiami CISPR 16,

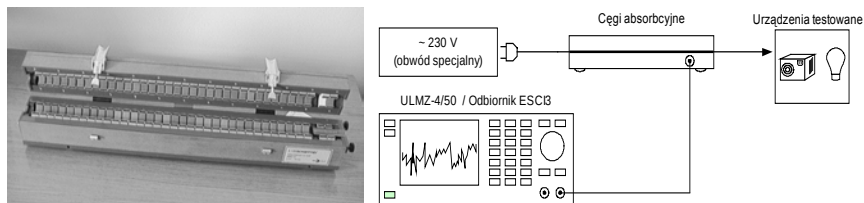


Rys.8.2.7b. Schemat stanowiska pomiarowego do badań zakłóceń przewodzonych w torze zasilania

Analiza przewodzonych zakłóceń elektromagnetycznych w zakresie wyższych częstotliwości, tj. powyżej 30MHz wymaga badań i ich interpretacji opartych na specjalnych laboratoryjnych, metodach pomiarowych. Większość metod, które umożliwiają wykonywanie pomiarów w pomieszczeniach zamkniętych, polega na pomiarze mocy zakłóceń.

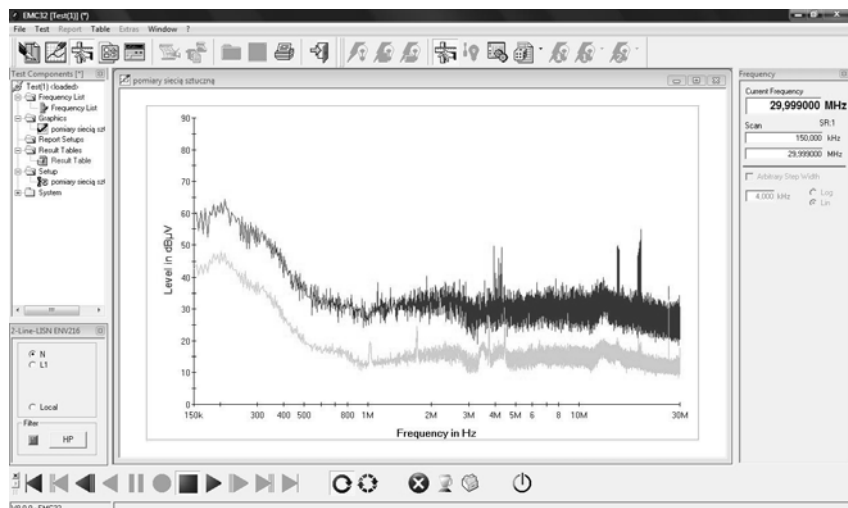
W urządzeniach elektrycznych i elektronicznych, których rozmiary są małe w porównaniu z długością fali promieniowanych zakłóceń, emisja propaguje przez dołączone do nich linie zasilające, przewody sterujące lub kable interfejsowe. Źródłem takiego promieniowania jest zazwyczaj składowa niesymetryczna prądu „płynąca” w dołączonych do badanego obiektu przewodach. Dla tego typu urządzeń została opracowana laboratoryjna metoda pomiaru mocy dysponowanej, wykorzystująca urządzenie pomocnicze zwane cęgami absorpcyjnymi (metoda MDS — Meyer de Stadelhofen). Metoda jest zalecana przez normę CISPR 16 do pomiaru mocy promieniowanej przez elektryczne urządzenia powszechnego użytku, z wyjątkiem odbiorników radiowych i telewizyjnych. Metoda polega na pomiarze natężenia prądu zakłóceń płynącego w obwodzie: źródło zakłóceń → impedancja źródła zakłócenia → impedancja obciążenia w warunkach dopasowania (obciążenie  $Z_o \approx R_o$ ). Jako układ dopasowujący stosuje się odcinek linii dołączonej do badanego obiektu o odpowiednio dobranej długości. Jeżeli impedancję obciążającą  $Z_{obc}$  umieścimy w miejscu występowania pierwszego maksimum fali stojącej, jaka powstaje w linii dołączonej do badanego obiektu, to następuje kompensacja składowych urojonych. W praktycznych zastosowaniach impedancję obciążającą ( $Z_{obc} \approx R_o$ ) stanowi specjalne urządzenie zwane cęgami absorbcyjnymi. Obejmują one promieniującą linię i mogą być przesuwane wzdłuż niej do miejsca, w którym następuje kompensacja składowej urojonej impedancji, a więc dopasowanie. Miernik zakłóceń jest dołączony do specjalnego transformatora prądowego umieszczonego w cęgach, który umożliwia pomiar prądu płynącego przez obciążenie  $R_o$ . [1,3-7,10,30-37]

Metodę można także stosować w sytuacji gdy wymiary badanego urządzenia (bez przewodów połączeniowych) są zbliżone do 1/4 długości fali odpowiadającej częstotliwości pomiarowej. Wówczas to jego obudowa może być źródłem bezpośredniego promieniowania.



Rys.8.2.8. Pomiarowe cęgi absorbcyjne AMZ 41, schemat układu do badania mocy zakłóceń elektromagnetycznych w zakresie 30-300MHz

Tak jak i w przypadku badań emisji promieniowanej podstawowym urządzeniem na stanowisku pomiarowym jest miernik zakłóceń. Do pomiarów zakłóceń przewodzonych jest wykorzystywany w Instytucie IPEiE odbiornik pomiarowy ESCI3. Współpracując z programem EMC32 umożliwia poprzez aparaturę pomocniczą (cęgi i sieć sztuczną) przeprowadzenie szybkiego pomiaru. Na poniższym rysunku zaprezentowano emisję przewodzoną miksera kuchennego wyznaczoną dla dwóch detektorów – maksymalnego i średniego.

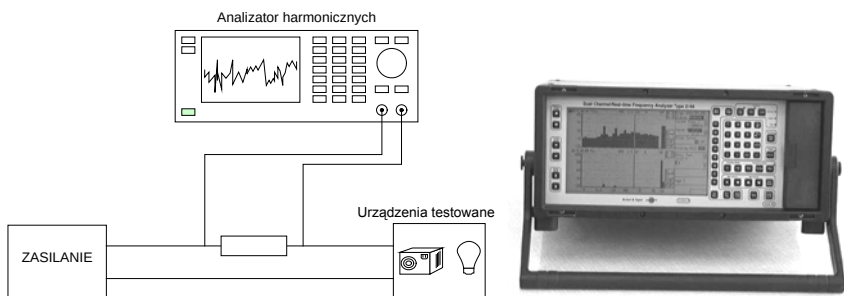


Rys.8.2.9. Przykładowa emisja zaburzeń elektromagnetycznych w paśmie 150kHz – 30MHz. Pomiary wykonano przy użyciu jednofazowej sieci sztucznej zasilającej ręczny, kuchenny mikser

### 8.2.3.3. Metody badań harmoniczných w układzie zasilania urządzeń

Nowoczesne urządzenia i systemy wykorzystujące moduły z przekształtnikami energoelektronicznymi są obecnie coraz częściej źródłami wyższych harmoniczných wprowadzanych do sieci energetycznej. Wpływają przez to negatywnie na jakość energii elektrycznej. Choć w przypadku pojedynczych urządzeń małej mocy analizowane prądy są bardzo małe, to ze względu na ilość instalowanych urządzeń i systemów zagadnienie wymaga rozwiązania systemowych powiązanych z kompatybilnością elektromagnetyczną. Dla zapewnienia zgodności urządzeń z wymogami kompatybilności powstała konieczność zastosowania w procesie oceny wprowadzanych na rynek urządzeń normy określającej dopuszczalną emisję harmoniczných prądu do sieci energetycznej (PN-EN-61000-3-2). Dotyczy ona urządzeń zasilanych z sieci jedno- lub trójfazowej pobierającej prąd nie większy niż 16A dla każdej z faz. Urządzenia podlegające normie podzielono na cztery kategorie: A, B, C i D. Istotne jest również, że dopuszczalne wartości harmoniczných nie zależą od mocy urządzenia. [5,12,19]

Badanie powinno być przeprowadzone zgodnie z ogólnymi wymaganiami podanymi w normie 61000-3-2. Pomiar harmoniczných należy przeprowadzić dla każdego rzędu harmoniczných mierząc wygładzoną w czasie 1,5 s skuteczną wartość harmoniczných w każdym oknie czasowym DFT. Uzyskane wartości porównuje się z wartościami granicznymi obowiązującymi dla danej grupy produktów A-D.



Rys.8.2.10. Schemat układu pomiarowego do analizy harmonicznych oraz analizator Brüel&Kære 2144

#### 8.2.3.4. Metody badań odporności urządzeń elektrycznych

Odporność urządzeń na zaburzenia elektromagnetyczne bada się przeprowadzając badania odporności na znormalizowaną emisję zaburzeń i obserwując pracę urządzenia czy maszyny. Badania te w skrajnych przypadkach (jeżeli urządzenia jest źle zaprojektowane i wykonane) mogą być badaniami niszczącymi lub stwarzającymi zagrożenie.

Odporność urządzenia na zakłócenia nie zależy wyłącznie od jego budowy. W dużym stopniu zależy także od jakości użytych technik produkcji masowej. Dalsze słabe miejsca, często wynikają ze sposobów montażu i zastosowanych metod instalacji urządzeń w kompletny system, w tym okablowania i uziemienia.

Idea pomiarów odpornościowych polega na oddziaływaniu w określonych warunkach na obiekt testowany sygnałem lub sygnałami o ściśle określonych parametrach. W pomiarach odporności urządzeń na działanie pól elektromagnetycznych, należy w obszarze pomiarowym wytworzyć pole, którego natężenie ma określoną wartość i niejednorodność nieprzekraczającą poziomu wymaganego przez normy. Testy podatności obejmują także badanie odporności urządzeń na sygnały, które rozchodzą się poprzez przewodzenie. Są one bardzo zróżnicowane, a należą do nich m.in. symetryczne i asymetryczne zakłócenia przewodzone, przepięcia, szybkie zakłócenia impulsowe oraz wyładowania elektrostatyczne. Realizacja tych testów wymaga wygenerowania sygnałów oraz ich wprowadzenia w wyniku sprzężeń do przewodów lub - w przypadku wyładowań elektrostatycznych ESD - do wnętrza obudowy obiektu badanego [3-9,11,13-29].

Pełna procedura testów odpornościowych wymaga przeprowadzenia narażenia testowanego obiektu [11-29]:

- na pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej od 0,03 do 3 GHz,
- na zaburzenia przewodzone, indukowane przez pola o częstotliwości radiowej od 100 kHz do 200 MHz,
- na serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych typu „Burst”, (wprowadzanych do przewodu zasilającego lub przewodów sygnałowych imitujących zaburzenia, jakie powstają przy przełączaniu styków np.

- przełączników, styczników pod obciążeniem)
- na udary typu „Surge”, (wprowadzane do przewodu zasilającego i ewentualnie przewodów sterujących, imitujące zaburzenia powstałe przy wyładowaniach atmosferycznych)
- na wyładowania elektrostatyczne,
- na pole magnetyczne o częstotliwości sieci elektroenergetycznej 50 i 60Hz,
- na impulsowe pole magnetyczne,
- na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia zasilania.

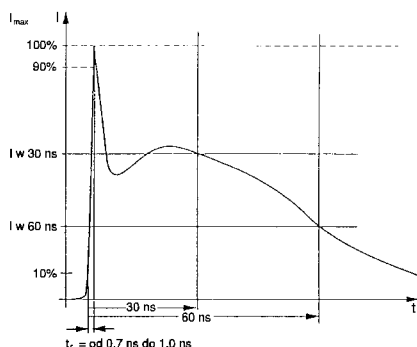


Rys 8.2.11. Znormalizowane stanowisko do badań odporności oparte na zestawie składającym się z generatora zakłóceń Modula 6000, pojemnościowego układu sprzęgającego zakłócenia Burst z torem transmisji danych - CDN 8014, układu sprzęgającego impulsy Surge w liniach transmisyjnych - CDN 117M, transformatora krokowego do zapadów napięcia - INA 6501, autotransformatora do pełnych wahań napięcia - VAR 6503, automatycznego systemu generującego pole magnetyczne (antena, układ kształtowania impulsów) - MFO6502, INA702, INA752

Test ESD (ang. electrostatic discharge) odwzorowuje zjawisko wyładowania elektrostatycznego i wskazuje słabe miejsca urządzenia lub elementu wyposażenia. Urządzenie symulujące – generator ESD, musi być tak zbudowane by odtwarzać praktyczne warunki w sposób realistyczny, jednocześnie zapewniając powtarzalność testu. Podstawowe własności generatora definiują parametry samego wyładowania elektrostatycznego, tj. wartość napięcia (potencjału) elektrostatycznego, wartość szczytową prądu wyładowania, biegunowość, czas narastania i opadania impulsu prądu wyładowania. Istotną cechą wyładowań elektrostatycznych jest wysoka częstotliwość. Ścieżka zakłóceń i skutki wyładowania muszą być szacowane w zakresie od ok. 30 MHz do 1 GHz.

Badanie odporności na wyładowania elektryczności statycznej jest realizowane za pomocą serii pojedynczych impulsów z generatora probierczego, podawanych na określone w planie testu punkty rozmieszczone na powierzchni testowanego obiektu – narażenie bezpośrednie, lub na powierzchniach tzw. poziomej i pionowej płaszczyzny sprzęgającej – narażenie pośrednie, umieszczonych w sąsiedztwie testowanego obiektu i symulujących wpływ wyładowań do innych obiektów usytuowanych w pobliżu testowanego obiektu.

Kształt impulsu prądu wyjściowego generatora probierczego ESD powinien być zgodny z Rys.8.12. [11,13,14,28,29]



Rys.8.2.12. Znormalizowany kształt impulsu ESD oraz generator NSG 435 firmy Schaffner

Wyładowania elektryczności statycznej należy stosować tylko do takich punktów i powierzchni sprzętu badanego (EUT), które są dostępne dla operatora podczas normalnej eksploatacji. Napięcie probiercze należy zwiększać od wartości minimalnej do wybranego poziomu probierczego w celu wyznaczenia progu występowania zakłóceń w działaniu.

Wszystkie testy odpornościowe (Surge, Burst, ESD, zapady ...) należy odnieść do pracy testowanego obiektu. Wyniki oddziaływania narażeń elektromagnetycznych oceniane są wg następującego kryterium:

- normalne działanie w granicach wymagań technicznych
- chwilowe ograniczenie lub utrat funkcji albo działania, które przywraca się samoczynnie
- chwilowe ograniczenie lub utrat funkcji albo działania, które wymaga interwencji operatora lub przywrócenia stanu początkowego systemu
- ograniczenie lub utrata funkcji, której nie można przywrócić z powodu uszkodzenia sprzętu, programu lub utrata danych

Pozytywne przejście testów zapewnia zgodność badanego urządzenia z wymaganiami norm technicznych i dyrektywy EMC. Domniemania się wówczas, że każdy produkt wyprodukowany zgodnie z normami zharmonizowanymi jest zgodny z wymaganiami odpowiednich dyrektyw.

#### 8.2.4. Wnioski

Oddziaływanie zaburzeń elektromagnetycznych może być różne i może prowadzić do poważnych zagrożeń. Powszechne uzależnienie od elektroniki w zastosowaniach o krytycznym znaczeniu dla społeczeństwa nadaje sprawie odporności systemów na zakłócenia elektromagnetyczne szczególne znaczenie. Zasadnicza część analizy jakości urządzenia polega na określaniu poziomów

emisji, odporności, kompatybilności i odniesieniu ich do dopuszczalnych wartości. Określenie poziomów tychże parametrów w fazach projektowo-konstrukcyjnych pozwala na wyznaczenie wszystkich błędów w funkcjonowaniu urządzenia. Dzięki takiej analizie efektywniej są dobierane zabezpieczenia przeciwdziałające małej odporności lub dużej emisyjności urządzeń.

### **8.3. Wymagania w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej dla wyrobów elektrycznych**

#### **8.3.1. Akty prawne regulujące kompatybilność elektromagnetyczną**

Wymagania dla wyrobów elektrycznych i elektronicznych w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) określone są przez dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2004/108/WE z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej oraz uchylającej dyrektywę 89/336/EWG [38].

Do dnia 20 lipca 2009 r. mogły być jeszcze wprowadzane do obrotu<sup>2</sup> lub oddawane do użytku<sup>3</sup> wyroby (również w okresie przejściowym stosowania dyrektywy 2004/108/WE) dla których zastosowano wymagania i procedury oceny zgodności określone w dyrektywie „starej” 89/336/EWG. Od tej daty stosowanie „nowej” dyrektywy 2004/108/WE jest obowiązkowe w dokonywaniu oceny zgodności wyrobów i tylko takie wyroby, dla których z tą dyrektywą wykazano zgodność mogą być wprowadzane do obrotu lub oddawane do użytku. Wymagania w zakresie EMC powinny spełniać wyroby elektryczne i elektroniczne wprowadzone do obrotu lub oddane do użytku na terenie państw członkowskich Europejskiego Porozumienia o Wolnym Handlu (EFTA).

Przepisów dyrektywy nie stosuje się bezpośrednio. Wszystkie państwa członkowskie są zobligowane do transponowania zapisów dyrektywy EMC. Polskie przepisy prawne wdrażają postanowienia dyrektywy EMC 2004/108/WE ustawą o kompatybilności elektromagnetycznej z 2004 r. [39] oraz ustawą o systemie oceny zgodności z 2002 r. [40].

Głównymi celami uregulowań w zakresie EMC jest stworzenie akceptowalnego środowiska elektromagnetycznego w państwach członkowskich oraz ułatwienie swobodnego przepływu wyrobów elektrycznych i elektronicznych na ich terenie.

Wyroby dla których została przeprowadzona ocena zgodności w zakresie EMC zgodnie z postanowieniami dyrektywy 2004/108/WE nie powinny mieć dodatkowych ograniczeń w obrocie handlowym związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną w poszczególnych państwach członkowskich.

---

<sup>2</sup> Wprowadzenie do obrotu – należy przez to rozumieć udostępnienie przez producenta, jego upoważnionego przedstawiciela lub importera, nieodpłatnie albo za opłatą, po raz pierwszy na terytorium państwa członkowskiego Unii Europejskiej lub państwa członkowskiego EFTA – strony umowy o Europejskim Obszarze Gospodarczym wyrobu w celu jego używania lub dystrybucji [40].

<sup>3</sup> Oddanie do użytku – należy przez to rozumieć pierwsze na terytorium państwa członkowskiego Unii Europejskiej lub państwa członkowskiego EFTA – strony umowy o Europejskim Obszarze Gospodarczym zgodne z przeznaczeniem użycie wyrobu, który nie został wprowadzony do obrotu [40].



### 8.3.2. Wymagania zasadnicze EMC

Wymagania zasadnicze w zakresie EMC określone są w ustawie [39] jako:

- niewywoływania w swoim środowisku zaburzeń elektromagnetycznych o wartościach przekraczających odporność na te zaburzenia innego urządzenia występującego w tym środowisku oraz;
- posiadania wymaganej odporności na zaburzenia elektromagnetyczne.

Takie wymagania musi spełniać każda aparatura<sup>4</sup>, komponent<sup>5</sup>, instalacja ruchoma<sup>6</sup> oraz instalacja stacjonarna<sup>7</sup>. Przepisów ustawy [39] nie stosuje się jednak do wyrobów, które ze względu na zastosowanie lub konstrukcję podlegają innym regulacjom w zakresie EMC. Wyłączenia te są zapisane w art. 3 i 5 ustawy [39]. Wymaganiom dyrektywy EMC nie podlegają również urządzenia używane wyłącznie w służbie radiokomunikacji amatorskiej niebędące przedmiotem oferty handlowej, pomimo że wymagania EMC nie są regulowane przez inne przepisy dla tych urządzeń.

Przepisy ustawy [39] nie mają zastosowania do wyrobów, które nie są zdolne do wywoływania w swoim środowisku zaburzeń elektromagnetycznych o wartościach przekraczających odporność na te zaburzenia innych urządzeń występujących w tym środowisku oraz są odporne na zaburzenia elektromagnetyczne występujące zwykle podczas ich używania zgodnie z przeznaczeniem.

Poza wymaganiami zasadniczymi akty wdrażające dyrektywę EMC określają procedury oceny zgodności z wymaganiami zasadniczymi oraz „inne wymagania” określone przez tą dyrektywę. Do innych wymagań należy zaliczyć wymagania w zakresie oznakowania wyrobu, deklaracji zgodności, dokumentacji technicznej oraz wymaganej dokumentacji dołączonej do wyrobu.

Procedury oceny zgodności dla aparatury, komponentu oraz instalacji ruchomej są takie same i w dalszej części rozdziału nie będą oddzielnie rozpatrywane. Ocena zgodności instalacji stacjonarnej (ze względu na jej niezmiennie miejsce użytkowania) jest nieco inna od pozostałych wyrobów co zostanie oddzielnie zaprezentowane w dalszej części rozdziału.

### 8.3.3. Procedury oceny zgodności wyrobów

Ocenę zgodności aparatury z wymaganiami zasadniczymi EMC może przeprowadzić producent lub jego upoważniony przedstawiciel posiadający pisemne upoważnienie od producenta. Dla instalacji stacjonarnej ocenę jej zgodności przeprowadza wykonawca instalacji. Oceny takiej nie może dokonać importer wyrobu lub jego użytkownik, jeżeli nie posiada pisemnego

<sup>4</sup> Aparatura – każdy gotowy wyrób lub zespół wyrobów, które są dostępne w obrocie jako odrębne jednostki funkcjonalne przeznaczone do używania lub do montażu przez użytkownika oraz zdolne do wywoływania zaburzeń elektromagnetycznych lub podatne na nie [39].

<sup>5</sup> Komponent – wyrób o różnym stopniu złożoności przeznaczony do montażu w aparaturze przez użytkownika, który może wytwarzać zaburzenia elektromagnetyczne lub na którego działanie takie zaburzenia mogą mieć wpływ [39].

<sup>6</sup> Instalacja ruchoma – połączenie kilku rodzajów aparatury albo połączenie aparatury i innych wyrobów, którego przeznaczeniem jest używanie w różnych lokalizacjach [39].

<sup>7</sup> Instalacja stacjonarna – połączenie kilku rodzajów aparatury albo połączenie aparatury i innych wyrobów, którego celem jest używanie w określonej i stałej lokalizacji [39].

upoważnienia od producenta wyrobu.

Przed przystąpieniem do oceny zgodności w zakresie EMC należy przeanalizować czy urządzenie może wywoływać w swoim środowisku zaburzenia elektromagnetyczne, które mogą pogorszyć pracę innych urządzeń w tym środowisku oraz czy urządzenie jest odporne na takie zaburzenia. Wymóg ten jest warunkiem koniecznym określonym przez art. 4 ustawy [39]. Zasadą uproszczoną jaką można przyjąć dla takiej klasyfikacji jest przeanalizowanie czy urządzenie przetwarza lub wytwarza falę elektromagnetyczną (przewodzoną lub promieniowaną). Wyroby takie stanowią potencjalne źródło zaburzeń elektromagnetycznych jak i mogą na takie zaburzenia nie być odporne. Część urządzeń jest wyłączona spod stosowania wymagań dyrektywy EMC ze względu na swoją budowę lub zastosowanie np. baterie bez elektroniki, silniki indukcyjne bez sterowników i falowników, zegarki kwarcowe bez dodatkowych funkcji, żarówki (nie dotyczy świetlówek energooszczędnych), radiowe anteny pasywne, rezystory, kondensatory, cewki, diody, LED itp. [41]. Należy również sprawdzić czy urządzenie nie podlega innym regulacjom w zakresie EMC (w części lub całości) zgodnie z art. 3 i 5 ustawy [39], co również spowoduje wyłączenie spod stosowania wymagań dyrektywy EMC.

Przy dokonywaniu oceny zgodności w zakresie EMC należy pamiętać, że dyrektywa EMC odnosi się do środowiska w którym urządzenie pracuje. Nie ma natomiast zastosowania do pracy samego urządzenia i zaburzeń elektromagnetycznych, które powstają wewnątrz urządzenia i nie przedostają się na zewnątrz - do środowiska pracy urządzenia. Normy określają poziomy zaburzeń elektromagnetycznych zarówno emisji jak i odporności na liniach wejściowych i wyjściowych (zasilanie, sterowanie, interfejsy współpracy z innymi urządzeniami), oraz poziomy zaburzeń promieniowanych przez urządzenie i odporności na nie.

Analiza zjawisk elektromagnetycznych jakie zachodzą podczas zgodnego z przeznaczeniem używaniem, jak i określenie właściwego środowiska pracy urządzenia pozwoli na właściwe dobranie norm zharmonizowanych lub innych działań zapewniających pełną zgodność z wymaganiami zasadniczymi. Uwzględnić należy emisję oraz odporność zarówno przewodzoną jak i promieniowaną, oraz dodatkowo zjawiska elektrostatyczne [41].

Jedną z najczęściej stosowanych metod oceny zgodności przez producentów, a zarazem i najłatwiejszą metodą jest procedura zastosowania w całości odpowiednich dla wyrobu norm zharmonizowanych dla dyrektywy EMC. Zapewnia to domniemanie spełnienia przez wyrób wymagań zasadniczych EMC. Dobór norm powinien uwzględniać analizę zjawisk elektromagnetycznych wyrobu o których mowa powyżej oraz przeznaczenie funkcjonalne wyrobu z uwzględnieniem środowiska w jakim będzie wyrób używany. Normy powinny być dobierane zgodnie z piramidą norm [42] z uwzględnieniem środowiska w jakim będzie urządzenie pracowało oraz zjawisk jakie zachodzą przy zgodnym z przeznaczeniem użytkowaniu wyrobu. Wykaz norm zharmonizowanych publikowanych jest przez Prezesa Polskiego Komitetu Normalizacyjnego w Dzienniku Urzędowym RP „Monitor Polski”. Wykaz ten dostępny jest również na stronie [www.pkn.pl](http://www.pkn.pl).

Zastosowanie norm zharmonizowanych przez osobę dokonującą oceny

zgodności jest dobrowolne. W przypadku gdy normy zharmonizowane nie zostały zastosowane lub producent zastosował je tylko w części oceny zgodności podmiot, który dokonuje oceny zgodności musi w inny sposób wykazać że wyrób spełnia wymagania zasadnicze. Może dokonać tego poprzez przedstawienie wyników obliczeń związanych z projektowaniem wyrobu oraz przeprowadzić odpowiednie badania. W przypadku takim wymagania w stosunku do dokumentacji technicznej są bardziej rygorystyczne.

Ocenę zgodności aparatury przeprowadza się dla wszystkich warunków działania tej aparatury, do jakich jest ona przeznaczona. Jeżeli aparatura może być używana w różnych konfiguracjach wystarczające jest przeprowadzenie oceny zgodności dla konfiguracji o największym poziomie zakłóceń i najmniejszej odporności aparatury na działanie takich zakłóceń. Podejście takie znacznie skróci czas wykonywania badań jak i koszty poniesione przez podmiot tego dokonujący, wymaga jednak znacznie większej wiedzy od podmiotu dokonującego oceny zgodności w celu określenia właściwych konfiguracji.

W procedurze oceny zgodności może wziąć udział jednostka notyfikowana. Dokonuje ona analizy dokumentacji technicznej przekazanej przez osobę dokonującą oceny zgodności w zakresie przez nią wskazanym. Z przeprowadzonej analizy jednostka notyfikowana przekazuje oświadczenie wnioskodawcy, że wyrób spełnia wymagania zasadnicze w zakresie przez nią analizowanym w przypadku potwierdzenia przez jednostkę notyfikowaną zgodności aparatury w rozpatrywanym zakresie. Udział jednostki notyfikowanej nie jest obligatoryjny, a decyzja o tym należy wyłącznie do osoby, która przeprowadza ocenę zgodności.

Aparatura, która ma być montowana w instalacji stacjonarnej nie musi być poddawana oddzielnej procedurze oceny zgodności. Wystarczające jest przeprowadzenie procedury oceny zgodności łącznie z instalacją stacjonarną.

Procedurę oceny zgodności aparatury przeprowadza się dla reprezentatywnej próbki wyrobu danego typu. Określenie typu dla którego była przeprowadzona procedura oceny zgodności powinno być wskazane w dokumentacji technicznej i deklaracji zgodności. Należy jednak pamiętać, że każdy kto przeprowadził procedurę oceny zgodności powinien okresowo sprawdzać czy nie zmieniły się wymagania zasadnicze lub inne wymagania dla danego rodzaju wyrobu. Należy również zwrócić uwagę na normy zharmonizowane. Kilka razy w roku publikowane są numery norm zharmonizowanych z dyrektywą EMC. Jednocześnie wskazywane są daty kiedy taka harmonizacja ustaje starej (często zastąpionej nową) wersji normy. Każdy egzemplarz wyrobu wprowadzany jest do obrotu lub oddawany do użytku indywidualnie z chwilą udostępnienia go lub przekazania po raz pierwszy. Zastosowane normy zharmonizowane muszą być właściwe na dzień wprowadzenia do obrotu lub oddania do użytku.

### **8.3.4. Dokumentacja związana z oceną zgodności oraz oznakowanie CE**

Z przeprowadzonej procedury oceny zgodności podmiot, który tego dokonał, powinien zgromadzić dokumentację techniczną potwierdzającą zgodność wyrobu z wymaganiami zasadniczymi. Zakres dokumentacji

technicznej określony jest przez ustawę [39], jednak należy pamiętać, że zapisy zawarte w dokumentacji technicznej muszą potwierdzać (poprzez pomiary lub obliczenia), że wyrób spełnia wymagania zasadnicze.

#### **8.3.4.1. Dokumentacja techniczna aparatury**

Dokumentacja techniczna aparatury powinna zawierać dane umożliwiające jej identyfikację np. nazwa wyrobu, model/typ, seria. Informacje identyfikujące aparaturę w dokumentacji technicznej powinny być identyczne z informacjami umieszczonymi na wyrobie oraz w deklaracji zgodności. Jeżeli w procedurze oceny zgodności zastosowano normy zharmonizowane należy dołączyć dowody spełniania przez wyrób wskazanych norm zharmonizowanych (najczęściej będą to wyniki badań). Jeżeli nie zastosowano norm zharmonizowanych lub zastosowano je częściowo należy przedstawić wyjaśnienia podjętych działań potwierdzających spełnienie przez wyrób wymagań zasadniczych w szczególności wyniki obliczeń związanych z projektowaniem urządzenia i opis przeprowadzonych badań lub testów. Jeżeli w ocenie zgodności brała udział jednostka notyfikowana należy dołączyć do dokumentacji technicznej oświadczenie tej jednostki.

Producent lub jego upoważniony przedstawiciel zobowiązany jest przechowywać dokumentację techniczną aparatury przez okres 10 lat od daty wyprodukowania ostatniego egzemplarza wyrobu. Jeśli na terenie państw członkowskich nie ma producenta aparatury lub jego upoważnionego przedstawiciela obowiązek ten ciąży na osobie, która wprowadziła aparaturę do obrotu (np. importer).

#### **8.3.4.2. Dokumentacja techniczna instalacji stacjonarnej**

Dokumentacja techniczna instalacji stacjonarnej powinna zawierać opis i schemat instalacji której dotyczy oraz wyniki przeprowadzonych badań z wymaganiami zasadniczymi. Dodatkowo wykonawca instalacji jest zobowiązany do umieszczenia informacji w dokumentacji technicznej w zakresie:

- sposobie postępowania w trakcie montażu instalacji, w tym aparatury wchodzącej w jej skład;
- informacje pozwalające na identyfikację wykonawcy instalacji oraz producenta aparatury stanowiącej jej wyposażenie oraz jego upoważnionym przedstawicieli, lub osobie która wprowadziła wyrób do obrotu;
- danych pozwalających na jednoznaczną identyfikację instalacji np. nazwa, model/typ, oznaczenie partii, numer seryjny.

Wykonawca instalacji dołącza do dokumentacji technicznej instrukcję używania i konserwacji instalacji stacjonarnej.

Dokumentacja techniczna instalacji stacjonarnej powinna być sporządzona przez wykonawcę instalacji i przekazana właścicielowi lub użytkownikowi instalacji. Właściciel lub użytkownik instalacji stacjonarnej zobowiązany jest przechowywać dokumentację techniczną przez cały okres używania instalacji stacjonarnej. W razie potrzeby użytkownik powinien aktualizować dokumentację techniczną i zapewnić utrzymanie instalacji

stacjonarnej w stanie zapewniającym spełnianie przez nią wymagań zasadniczych. Za wykonawcę instalacji stacjonarnej uważa się również osobę, która dokonała jej modernizacji.

#### **8.3.4.3. Deklaracja zgodności**

W celu potwierdzenia, że aparatura spełnia wymagania zasadnicze producent lub jego upoważniony przedstawiciel wystawia deklarację zgodności i oznacza wyrób oznakowaniem CE. Deklaracja zgodności jest oświadczeniem jej wystawcy, że wyrób spełnia wymagania zasadnicze i powinna zawierać co najmniej:

- wskazanie dyrektywy, której wymagania zasadnicze spełnia aparatura;
- opis aparatury umożliwiający jej jednoznaczną identyfikację (nazwa, model/typ, oznaczenie partii) opis ten powinien być zgodny z opisem na wyrobie i w dokumentacji technicznej;
- wskazanie datowanych wersji norm zharmonizowanych lub informacje o innych działaniach potwierdzających, że aparatura spełnia wymagania zasadnicze;
- datę wystawienia deklaracji;
- imię i nazwisko osoby upoważnionej do jej podpisania (upoważnienie pisemne).

Deklarację zgodności należy dołączyć do dokumentacji technicznej aparatury. Producent lub jego upoważniony przedstawiciel może dołączyć do urządzenia deklarację zgodności, lub udostępnić ją np. na stronie Internetowej, lecz nie ma takiego obowiązku prawnego w zakresie wymagań dyrektywy EMC.

Jeżeli dla danego wyrobu były przeprowadzone oceny zgodności określone w kilku dyrektywach producent lub jego upoważniony przedstawiciel wystawia jedną deklarację zgodności poszerzoną o zapisy wymagane przez pozostałe dyrektywy.

Dla instalacji stacjonarnej nie wystawia się deklaracji zgodności.

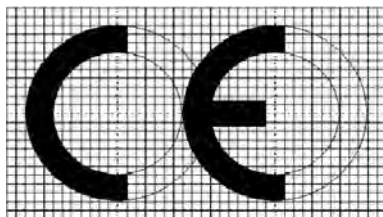
#### **8.3.4.4. Oznakowanie CE**

Oznakowanie CE jest potwierdzeniem dla użytkownika wyrobu, że wyrób jest zgodny z wymaganiami zasadniczymi.

Po przeprowadzonej ocenie zgodności i wystawieniu deklaracji zgodności producent lub jego upoważniony przedstawiciel umieszcza na aparaturze lub jej tabliczce znamionowej oznakowanie CE. Jeżeli jest brak takiej możliwości należy wówczas oznaczyć dokumentację dołączoną do wyrobu (instrukcję obsługi, kartę gwarancyjną), oraz opakowanie jeżeli jest. Oznakowanie musi być naniesione w sposób czytelny i trwały. Dopuszczalne jest naniesienie oznakowania w miejscach dostępnych przez użytkownika wyrobu np. pojemniki na baterie. Obok oznakowania CE mogą znajdować się inne znaki pod warunkiem, że nie zmniejszą widoczności i czytelności oznaczenia CE oraz nie wprowadzą w błąd użytkownika wyrobu.

Trwałość oznakowania będzie zależała od przeznaczenia urządzenia. Dla większości urządzeń oznakowanie jest nanoszone w formie wytłoczenia na jego

obudowie. Urządzenia, które nie mają styczności z wodą lub innymi płynami, nie pracują w wysokiej temperaturze lub miejsca oznaczone nie są narażone na działania mechaniczne mogą być oznakowane poprzez naklejenie naklejki.



Rys. 8.3.1 Wzór oznakowania CE

Oznakowanie CE musi być zgodne ze wzorem określonym w ustawie [39]. Wymiary oznakowania nie powinny być mniejsze niż 5mmx5mm z zachowaniem proporcji. Dopuszcza się zmniejszenie oznakowania pod warunkiem, że wymaga tego konstrukcja aparatury.

Jeżeli dla danego wyrobu były przeprowadzone oceny zgodności określone w kilku dyrektywach producent lub jego upoważniony przedstawiciel umieszcza na wyrobie jedno oznakowanie CE. Jeżeli inne dyrektywy określają wymóg oznakowania dodatkowo opakowania oraz instrukcji obsługi nie stoi to w sprzeczności z wymaganiami dyrektywy EMC.

Instalacja stacjonarna nie podlega oznakowaniu CE.

#### **8.3.4.5. Instrukcja obsługi**

Do aparatury powinna być dołączona instrukcja jej obsługi wraz z informacjami dotyczącymi:

- środków ostrożności jakie użytkownik musi podjąć podczas montowania, instalowania, użytkowania i konserwacji aparatury;
- ograniczenia w używaniu aparatury na terenie zabudowy mieszkalnej, jeżeli jej normalne używanie nie zapewnia zgodności z wymaganiami zasadniczymi EMC;
- adres producenta, jego upoważnionego przedstawiciela lub osoby odpowiedzialnej za wprowadzenie aparatury do obrotu;
- inne informacje niezbędne do używania aparatury zgodnie z przeznaczeniem.

Ustawodawstwo polskie w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej [39] nie wprowadza wymogu dołączania do instalacji stacjonarnej instrukcji obsługi. Zapisy związane z użytkowaniem i konserwacją instalacji stacjonarnej powinny być zawarte w dokumentacji technicznej.

#### **8.3.5. Ekspozowanie aparatury na targach, pokazach i wystawach**

Dopuszczalne jest ekspozowanie aparatury na targach, pokazach i wystawach, dla której nie została przeprowadzona procedura oceny zgodności oraz nie wystawiono deklaracji zgodności i nie oznakowano aparatury oznaczeniem CE. W takim przypadku wystawca zobowiązany jest do

uwidocznienia informacji obok wystawianej aparatury, że prezentowane urządzenie nie może być wprowadzane do obrotu, ani oddawane do użytku do czasu przeprowadzenia oceny zgodności.

Urządzenie, które nie było poddane procedurze oceny zgodności może być prezentowane na targach, pokazach i wystawach pod warunkiem, że wystawca zabezpieczy wyrób przed powstawaniem zaburzeń elektromagnetycznych.

### **8.3.6. Kontrola wyrobów w zakresie EMC**

Organami wyspecjalizowanymi w zakresie kontroli wyrobów wprowadzonych do obrotu lub oddanych do użytku podlegających pod dyrektywę EMC jest odpowiednio Prezes Urzędu Komunikacji Elektronicznej, oraz wyrobów stosowanych w zakładach górniczych Prezes Wyższego Urzędu Górniczego.

Organy wyspecjalizowane dokonują oceny w zakresie czy wyrób spełnia wymagania zasadnicze oraz inne wymagania w drodze kontroli. W przypadku gdy wyniki kontroli wskazują, że wyrób nie spełnia wymagań zasadniczych lub innych wymagań organ wyspecjalizowany może zakazać na określony czas (zarówno producentowi jak i innym podmiotom, które biorą udział w dystrybucji tego wyrobu) dalszego przekazywania wyrobu w drodze decyzji administracyjnej.

Organy wyspecjalizowane prowadzą postępowanie administracyjne mające na celu wyjaśnienie zaistniałej sytuacji oraz prowadzące do usunięcia stwierdzonych niezgodności lub wycofania wyrobu z obrotu przez stronę postępowania. Stroną postępowania może być podmiot, który wyrób wprowadził do obrotu lub oddał do użytku. Stroną postępowania może być również podmiot który nie może dokonać oceny zgodności np.: importer, odbiorca wewnątrz wspólnotowy, dystrybutor.

W przypadku gdy strona postępowania dobrowolnie wycofa wyrób z obrotu lub usunie jego niezgodności postępowanie administracyjne zostaje z urzędu umorzone. Brak jakichkolwiek działań ze strony postępowania jest podstawą do wydania decyzji administracyjnej przez organ wyspecjalizowany z art. 41c ust. 3 ustawy [39] w której m.in. może:

- nakazać wycofanie wyrobu z obrotu lub użytku;
- zakazać, lub ograniczyć dalsze przekazywanie wyrobu;
- nakazać powiadomienie konsumentów lub użytkowników wyrobu o stwierdzonych niezgodnościach;
- nakazać odkupienie wyrobu na żądanie osób które nim władają.

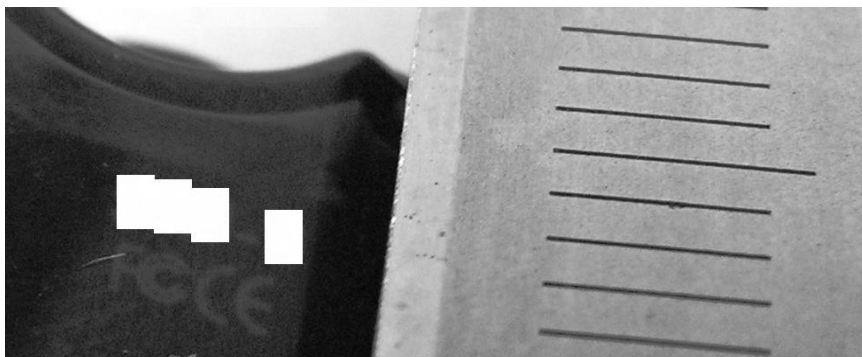
Wydanie decyzji o której mowa powyżej skutkuje wpisaniem wyrobu przez Urząd Ochrony Konkurencji i Konsumentów na listę wyrobów niezgodnych z podaniem podmiotu, który za wyrób odpowiada. Lista ta jest podana do publicznej wiadomości na stronach UOKiK.

Koszty związane z badaniem wyrobu w laboratorium w ramach kontroli w przypadku gdy wyrób nie spełnia wymagań zasadniczych ponosi osoba, która wprowadziła wyrób do obrotu. Ustawodawstwo polskie [39] przewiduje kary pieniężne za niespełnienie wymagań zasadniczych lub innych wymagań przez wyrób.

### **8.3.7. Najczęściej popełniane błędy w ocenie zgodności EMC**

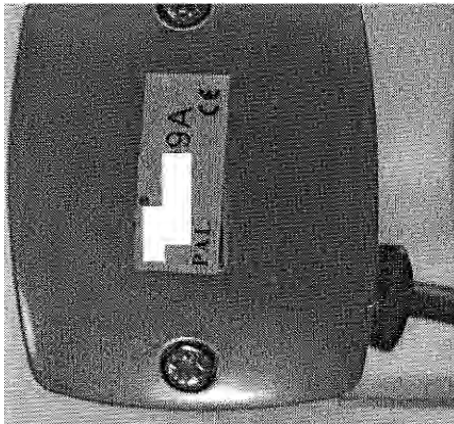
Poniższa lista przedstawia najczęściej popełniane błędy przez podmioty, które dokonują oceny zgodności w zakresie EMC.

- wprowadzenie do obrotu lub oddanie do użytku wyrobu, który nie spełnia wymagań zasadniczych – organ wyspecjalizowany w toku kontroli sprawdza zgodność oświadczenia producenta lub jego upoważnionego przedstawiciela (deklaracji zgodności) ze stanem faktycznym. Weryfikacja zgodności wyrobu z oświadczeniem producenta dokonywana jest najczęściej poprzez badania w laboratorium;
- ocena zgodności dokonana przez importera lub dystrybutora wyrobu – zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa importer lub dystrybutor wyrobu nie może dokonać oceny zgodności. Ocenę taką może dokonać tylko i wyłącznie producent wyrobu lub jego upoważniony przedstawiciel posiadający pisemne upoważnienie;
- wprowadzenie do obrotu wyrobu przez importera bez oznakowania CE lub bez dokonanej oceny zgodności – importer nie będzie mógł oznaczyć wyrobu znakiem CE oraz dokonać oceny zgodności a Urząd Celny może nie wyrazić zgody na dopuszczenie towaru do obrotu na terenie państw członkowskich;
- niezgodność cech identyfikujących wyrób umieszczonych na wyrobie, deklaracji zgodności, instrukcji obsługi – różne oznaczenie modelu wyrobu na samym wyrobie, deklaracji zgodności i instrukcji obsługi utrudnia jednoznaczną identyfikację wyrobu. W takim przypadku organ kontrolny może uznać, że brak jest instrukcji obsługi lub deklaracji zgodności dla kontrolowanego wyrobu;
- zbyt małe, nieczytelne lub brak oznakowania znakiem CE – poniżej przykłady małego oznakowania CE oraz nieczytelnego oznakowania CE zaklejonego plombą gwarancyjną. Nieprawidłowości te stanowią naruszenie postanowień dyrektywy EMC;



Rys. 8.3.2. Przykład małego oznakowania CE





Rys. 8.3.3. Przykład nieczytelnego oznakowania CE

- brak dołączonej instrukcji obsługi, niewłaściwe zapisy w niej zawarte lub instrukcja dołączona w obcym języku – brak informacji, które powinny być zawarte w instrukcji obsługi uniemożliwia korzystanie z urządzenia zgodnie z jego przeznaczeniem. Takie korzystanie z urządzenia nie zapewnia spełnienia wymagań zasadniczych zgodnie z przeprowadzoną oceną zgodności. Nieprawidłowość ta narusza również postanowienia ustawy o języku polskim;
- brak wskazania w deklaracji zgodności dyrektywy oraz datowanych wersji norm – informacje te nie pozwalają na jednoznaczną identyfikację dyrektywy z którą jest deklarowana zgodność oraz normy którą wyrób spełnia;
- deklaracja zgodności podpisana przez nieupoważnioną osobę – deklaracja zgodności musi być podpisana przez osobę umocowaną prawnie do reprezentowania producenta wyrobu lub upoważnionego jego przedstawiciela;
- zastosowanie norm niewłaściwych, niezharmonizowanych – organ kontroli może uznać, że wyrób nie spełnia wymagań zasadniczych jeżeli nie będzie dostatecznych na to dowodów w dokumentacji technicznej. Zastosowanie norm niezharmonizowanych nie zapewnia domniemania zgodności wyrobu z wymaganiami zasadniczymi;
- brak dołączonej informacji do wyrobu o podmiocie, który jest odpowiedzialny za wprowadzenie wyrobu do obrotu – Informacje te pozwalają na identyfikację przez użytkownika wyrobu lub organ wyspecjalizowany podmiotu który jest za niego odpowiedzialny;
- brak dokumentacji technicznej wyrobu potwierdzającej spełnianie wymagań zasadniczych – organ wyspecjalizowany może uznać, że nie była przeprowadzona procedura oceny zgodności. Sama deklaracja zgodności oraz oznakowanie CE nie jest wystarczające w procedurze oceny zgodności.

Problematyka kompatybilności elektromagnetycznej znana jest od dziesiątków lat, jednak regulacje prawne w tym zakresie pojawiły się stosunkowo niedawno. W roku 1989 została opublikowana dyrektywa regulująca problemy kompatybilności elektromagnetycznej. W Polsce wymagania dyrektyw EMC obowiązują od 1 maja 2004 r. W tym samym też roku opublikowano „nową” dyrektywę EMC [38]. Osoby, które zajmują się problematyką kompatybilności elektromagnetycznej muszą posiadać bogatą wiedzę techniczną z zakresu elektrotechniki i elektroniki, jak i wiedzę z zakresu prawa wspólnotowego oraz polskiego.

Istotnym problemem dla osób, które dokonują oceny zgodności jest właściwa interpretacja przepisów zarówno wspólnotowych jak i polskich oraz umiejętność ich stosowania. Konsekwencje błędnego zastosowania prawa w zakresie EMC mogą mieć poważne skutki zarówno finansowe jak i związane z bezpieczeństwem użytkowników urządzeń elektrycznych.

Zastosowanie właściwe norm zharmonizowanych lub innych działań potwierdzających spełnienie wymagań zasadniczych przez wyrób stwarza również wiele problemów osobom, które dokonują oceny zgodności. Niejednokrotnie badania wykonywane przez różne jednostki w zakresie tej samej normy dają różne wyniki. Spowodowane jest to najczęściej różnym zestawieniem stanowisk pomiarowych jak i różną interpretacją zapisów norm. Dokumentacja techniczna wyrobu w ocenie zgodności powinna być prowadzona bardzo starannie wraz z zapisaniem wszelkich szczegółów. Umożliwi to odwzorowanie przyjętego programu badań w ocenie zgodności przez organy kontroli.

Nieodzowne w dokonywaniu oceny zgodności jest więc połączenie przepisów prawa z wymaganiami technicznymi i „dobrą praktyką inżynierską”. Znajomość takich zagadnień pozwoli producentom oraz ich upoważnionym przedstawicielom na dokonanie oceny zgodności zgodnie z „duchem” dyrektywy EMC jak i w przeświadczeniu, że nie będą stanowiły zagrożenia związanego z kompatybilnością elektromagnetyczną.

## **8.4. Podsumowanie**

Osiągnięcie harmonijnej współpracy, coraz częściej występujących obok siebie systemów i urządzeń elektroenergetycznych, elektronicznych oraz informatycznych w środowisku elektromagnetycznym jest dość złożone. Oprócz kosztownych środków ochrony przed zakłóceniami, występuje konieczność zatrudniania personelu technicznego rozumiejącego całą złożoność problemów kompatybilności elektromagnetycznej. Dlatego też bardzo aktualnym wyzwaniem przed uczelniami technicznymi o elektrycznym profilu kształcenia jest dobre przygotowanie przyszłych inżynierów również w tym aspekcie. Powinni oni otrzymywać wiedzę i nabywać umiejętności zwalczania zakłóceń elektromagnetycznych zarówno w czasie produkcji, instalacji oraz eksploatacji różnych urządzeń elektroenergetycznych, ale także w fazie ich projektowania.

Wymienione przyczyny wskazują na konieczność wprowadzania oddzielnego przedmiotu dającego studentom wydziałów elektrycznych pełny obraz zagadnień kompatybilności. W Wydziale Elektrotechniki i Informatyki w Politechnice Lubelskiej realizowane są obecnie wykładowe i laboratoryjne

zajęcia dydaktyczne dla przedmiotu „Kompatybilność Elektromagnetyczna” jedynie dla grup studenckich objętych systemem tzw. studiów zamawianych. W perspektywie istnieje konieczność wprowadzenia tych zajęć dla wszystkich studentów kierunku „Elektrotechnika”.

## **8.5. Literatura**

- [1] Mazurek P.A.: Wpływ właściwości materiałów magnetycznych rdzeni dławików przeciwzakłóceńowych na skuteczność filtrowania zakłóceń przewodzonych, rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2007.
- [2] Mazurek P. A., Pomiar pól wysokiej częstotliwości w środowisku zurbanizowanym, materiały pokonferencyjne XIX Sympozjum Środowiskowego PTZE, 121-123.
- [3] Montrose M., Nakauchi E.: Testing for EMC compliance, IEEE PRESS, 2004.
- [4] Williams T, Armstrong K.: EMC for Systems and Installations, Newnews, 2000.
- [5] Kodali P., Engineering Electromagnetic Compatibility, IEEE PRESS, 2001
- [6] Armstrong K., Clough C., Williams T.: EMC Testing Part 1-6, [www.compliance-club.com](http://www.compliance-club.com).
- [7] Bogucki J., Chudziński A., Połujan J.: Emisja elektromagnetyczna urządzeń w praktyce, Telekomunikacja i techniki informacyjne, 1-2/2007, 85-95.
- [8] Mazurek P.A.: Measuring position to analyse the ESD immunity of electric devices, 6th International Conference, ELMECO 6, Electromagnetic Devices And Processes In Environment Protection.
- [9] Mazurek P.A.: Electromagnetic immunity test system, 6th International Conference, ELMECO 6, Electromagnetic Devices And Processes In Environment Protection.
- [10] Więckowski T.: Pomiar emisyjności urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [11] PN-EN 55024:2000, PN-EN 55024:2000/A1:2002 (U) - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Urządzenia informatyczne - Charakterystyki odporności - Metody pomiaru i dopuszczalne poziomy
- [12] PN-EN 61000-3-2:2002 (U) zastępująca normy: PN-EN 61000-3-2:1997 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznego prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika mniejszy lub równy 16 A)
- [13] PN-EN 61000-4-1:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 4-1: Metody badań i pomiarów. Przegląd serii norm IEC 61000-4
- [14] PN-EN 61000-4-2:1999PN-EN 61000-4-2:1999/A2:2003 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na wyładowania elektrostatyczne. Podstawowa publikacja EMC.
- [15] PN-EN 61000-4-3:2003(U) - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-3: Metody badań i pomiarów - Badania odporności na pole

elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej.

- [16] PN-EN 61000-4-4:1999, PN-EN 61000-4-4:1999/A1:2003, PN-EN 61000-4-4:1999/A2:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych. Podstawowa publikacja EMC.
- [17] PN-EN 61000-4-5:1998, PN-EN 61000-4-5:1998/A1:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na udary.
- [18] PN-EN 61000-4-6:1999, PN-EN 61000-4-6:1999/A1:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Odporność na zaburzenia przewodzone, indukowane przez pola o częstotliwości radiowej.
- [19] PN-EN 61000-4-7:1998 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznnych i interharmonicznnych oraz stosowanych do tego celu przyrządów pomiarowych dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń.
- [20] PN-EN 61000-4-8:1998, PN-EN 61000-4-8:1998/A1:2003 -Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na pole magnetyczne o częstotliwości sieci elektromagnetycznej.
- [21] PN-EN 61000-4-9:1998, PN-EN 61000-4-9:1998/A1:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na impulsowe pole magnetyczne.
- [22] PN-EN 61000-4-10:1999, PN-EN 61000-4-10:1999/A1:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na pole magnetyczne oscylacyjne tłumione.
- [23] PN-EN 61000-4-11:1997, PN-EN 61000-4-11:1997/A1:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia.
- [24] PN-EN 61000-4-12:1999, PN-EN 61000-4-12:1999/A1:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na przebiegi oscylacyjne.
- [25] PN-EN 61000-4-14:2002 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-14: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na wahania napięcia.
- [26] PN-EN 61000-4-28:2004 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-28: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na zmiany częstotliwości sieci zasilającej.
- [27] PN-EN 61000-4-29:2002(U) - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia na przyłączy zasilania prądu stałego.
- [28] PN-EN 61000-6-1:2002 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Wymagania ogólne dotyczące odporności na zaburzenia - Środowisko mieszkalne, handlowe i lekko uprzemysłowione
- [29] PN-EN 61000-6-2:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -

- Część 6-2: Normy ogólne - Odporność w środowiskach przemysłowych
- [30] PN-EN 61000-6-3:2002 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 6-3: Normy ogólne - Wymagania dotyczące emisyjności w środowisku mieszkalnym, handlowym i lekko uprzemysłowionym
  - [31] PN-EN 61000-6-4:2002(U) - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 6-4: Normy ogólne - Wymagania dotyczące emisyjności w środowisku przemysłowym
  - [32] PN-EN 55011, Dopuszczalne poziomy i metody pomiarów zaburzeń radioelektrycznych wytwarzanych przez przemysłowe, medyczne i naukowe (PMN) urządzenia wielkiej częstotliwości
  - [33] PN-EN 55022, Urządzenia informatyczne – Charakterystyki zaburzeń radioelektrycznych – Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru
  - [34] PN-EN 55014-1, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Wymagania dotyczące przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń. Część 1: Emisja zaburzeń elektromagnetycznych. Norma grupy wyrobów.
  - [35] PN-EN 55014-2, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Wymagania dotyczące przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń - Odporność na zaburzenia elektromagnetyczne -- Norma grupy wyrobów
  - [36] PN-CISPR 16-1:2000 EMC Wymagania dotyczące urządzeń i metod pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i odporności na zaburzenia radioelektryczne. Urządzenia do pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i odporności na zaburzenia radioelektryczne.
  - [37] PN-CISPR 16-2:1999 EMC Wymagania dotyczące urządzeń i metod pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i odporności na zaburzenia radioelektryczne. Metody pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i odporności na zaburzenia radioelektryczne.
  - [38] Dyrektywa 2004/108/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej oraz uchylającej dyrektywę 89/336/EWG (Dz. Urz. UE L 390 z 31.12.2004);
  - [39] Ustawa z dnia 13 .04.2007 r. o kompatybilności elektromagnetycznej (Dz.U. z 2007 r., nr 82, poz. 556);
  - [40] Ustawa z dnia 30.08. 2002 r. o systemie oceny zgodności (Dz.U. z 2004 r., nr 204, poz. 2087 z póź. zm.);
  - [41] Guide for the EMC Directive 2004/108/EC. Maj 2007.
  - [42] Borowiec J., Jóskiewicz Z. „Przygotowanie programu badań oraz urządzeń do badań EMC” Wybrane problemy kompatybilności elektromagnetycznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. V Krajowe Warsztaty Kompatybilności Elektromagnetycznej. Wrocław 2005, 57-67;

## **9. WYBRANE METODY OBLICZENIOWE I POMIAROWE URZĄDZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH**

### **9.1. Wstęp**

Utworzone w ostatnich latach Laboratorium Pomiarów Magnetycznych służące do badań i aplikacji materiałów magnetycznych, nawiązuje do wieloletniej tradycji naukowej Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Wykonywane są badania otwartych i zamkniętych próbek ferromagnetycznych, jak również rozpoczęto pracę nad nieniszczącą detekcją uszkodzeń. Praca w laboratorium skoncentrowana została nad problematyką identyfikacji. Na podstawie modeli matematycznych oraz badań eksperymentalnych, poszukuje się związków dla grup podobieństwa. Przy doborze aparatury szczególną wagę przywiązano do pomiaru kolekcji danych dynamicznych. Wyposażenie pracowni pozwala na badanie właściwości materiałów ferromagnetycznych techniką cyfrowej analizy sygnału, niezbędnej do pozyskania wyników dla analizy metodami stochastycznymi. Aparaturę pomiarową zbudowano z nowoczesnych komponentów techniki pomiarowej, głównie z produktów firmy National Instruments oraz ze środowiska programowania wizualnego LabView Development System.

W Instytucie prowadzone są również wstępne prace z zakresu inżynierii biomedycznej, dotyczące wpływu promieniowania elektromagnetycznego na organizmy żywe i diagnostyki medycznej w zakresie wczesnego wykrywania nowotworu piersi. W Polsce główną przyczyną zgonu kobiet w wieku poniżej 65 lat są nowotwory złośliwe, a wśród nich na pierwszym miejscu plasuje się właśnie rak piersi. Przedmiotem badań jest mikrofalowe obrazowanie nowotworu piersi przy użyciu metody różnic skończonych w dziedzinie czasu FDTD. Wstępna ocena pozwala określić tę metodę jako stosunkowo dobrą i konkurencyjną wobec stosowanych obecnie technik MRI oraz medycyny nuklearnej.

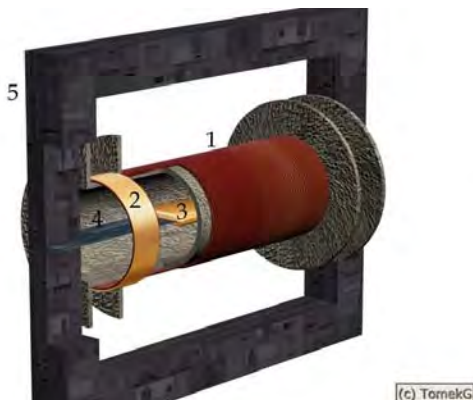
### **9.2. Systemy cyfrowej analizy sygnałów z pomiarów magnetycznych**

#### **9.2.1. Wprowadzenie**

Badania otwartych próbek ferromagnetycznych są głównym tematem zainteresowań w pracowni badań i aplikacji materiałów ferromagnetycznych. Współczesne techniki obliczania obwodów magnetycznych wymuszają precyzyjne modelowanie charakterystyk materiałów magnetycznych. Najczęściej stosowane modele polegają na wyznaczeniu charakterystyki rozgałęzionej za pomocą określenia udziału elementarnych operatorów histerezy (model Preisacha) lub na zdefiniowaniu nieliniowego równania różniczkowego zwyczajnego (model Jilesa-Athertona). Istotną kwestią pozostaje identyfikacja funkcji lub parametrów modelu [3, 5, 11, 12]. Można je wykonać za pomocą klasycznej aproksymacji funkcją analityczną lub dobierając współczynniki równań za pomocą metod statystycznych. W laboratorium badań i aplikacji materiałów magnetycznych podejmowana jest tematyka identyfikacji parametrów

modelu przy pomocy technik eksperymentalnych [1, 2, 4, 6, 14]. Dużą wagę przywiązano powiązaniu cyfrowej analizy sygnału ze znanymi metodami pomiarów magnetycznych. Naturalnym kierunkiem prowadzonych działań jest również praktyczna aplikacja w technologii badań nieniszczących, dla której w laboratorium dopracowywane są metody automatycznej klasyfikacji wad materiałowych na podstawie obrazu charakterystyki rozgałęzionej.

### 9.2.2. Permeametr jarzmowy Hopkinsona

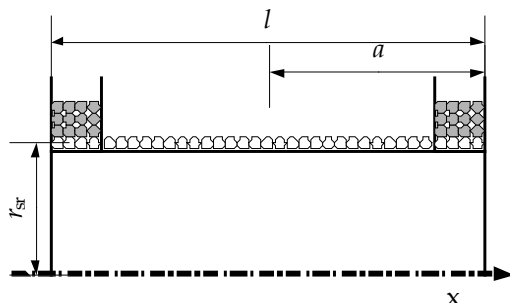


Rys.9.2.1. Poglądowy szkic jarzma Hopkinsona: 1 – uzwojenie magnesujące, 2 – uzwojenie kompensacyjne, 3 – uzwojenie pomiarowe, 4 – badana próbka, 5 – jarzmo zamykające

Aparatura znajdująca się na wyposażeniu laboratorium, w głównej części wykonawczej zbudowana została z permeametrów jarzmowych. Przedstawiony na rysunku (Rys. 1) pierwszy przyrząd, wykonany został w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej. Jest on przystosowany do badań cienkich taśm amorficznych lub ferromagnetycznych (4) o wymiarach 30×250 mm i grubości w zakresie 0,02÷0,5 mm. Dzielone jarzmo (5) służy do zamknięcia drogi strumienia magnetycznego. Wykonano je z materiału o dużej przenikalności magnetycznej, co zapewnia małą wartość reluktancji w stosunku do badanej próbki. Cewkę magnesującą (1) usytuowano tak, aby wzdłuż jej osi mógł być umieszczony badany materiał magnetyczny. Dodatkowe uzwojenie (2) zastosowano do wyrównania rozkładu pola magnetycznego wewnątrz cewki magnesującej. Pomiar indukcji magnetycznej  $B$  przeprowadzono metodą numerycznego całkowania sygnału napięciowego cewki pomiarowej (3) nawiniętej na próbce [4].

Natężenie pola magnetycznego  $h(t)$  wewnątrz cewki magnesującej, wyznaczone jest bezpośrednio z pomiaru wartości chwilowej prądu magnesującego  $i(t)$ . Na podstawie zależności określającej wartość natężenia pola magnetycznego na osi jednowarstwowego solenoidu o skończonej długości  $l$ , w punkcie oddalonym o  $a$  od jego krawędzi wyznaczana jest chwilowa wartość natężenia pola magnetycznego [5].

$$h(t) = \frac{Ni(t)r_{sr}^2}{2l} \int_{l-a}^l \frac{dx}{\left(r_{sr}^2 + x^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (9.2.1)$$



Rys. 9.2.2. Przekrój wzdłuż osi cewki magnesującej

W powyższej zależności przyjęto oznaczenia zgodne z rysunkiem (Rys. 9.2.2):  $N$  - liczba zwojów solenoidu,  $r_{sr}$  - promień pojedynczego zwoju. W obliczeniach przyjęto założenie o jednorodności pola wzdłuż osi (ze względu na zastosowaną kompensację) oraz wzdłuż promienia cewki. Przyjmując  $a=0,5 l$ , obliczenie całki w równaniu (9.2.1) prowadzi do postaci (9.2.2), wyrażającej wartość natężenia pola magnetycznego wewnątrz cewki magnesującej.

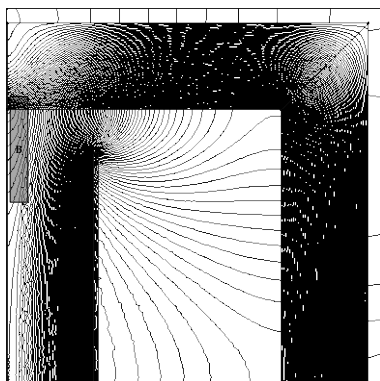
$$h(t) = i(t) \frac{N}{l \sqrt{1 + \left(\frac{2r_{sr}}{l}\right)^2}} \quad (9.2.2)$$

W przypadku pominięcia zakłócenia pochodzącego z nieliniowości jarzma, które pracuje w części liniowej charakterystyki, wartości chwilowe natężenia pola magnetycznego można przedstawić w postaci iloczynu stałej permeametry  $k_h$  oraz wartości chwilowej natężenia prądu w cewce magnesującej. Uwzględniając parametry konstrukcyjne, stała znajdującego się na wyposażeniu permeametry wynosi  $k_h=323,1 \text{ m}^{-1}$ .

Zastosowanie uzwojenia kompensującego wymaga wprowadzenia korekty do wyznaczonych wartości natężenia pola magnetycznego. Oszacowanie wartości prądu uzwojeń kompensujących przeprowadzono na podstawie wskazań wartości napięcia indukowanego w cewkach pomiarowych. W konstrukcji umieszczono dodatkowe uzwojenie, połączone przeciwsobnie z uzwojeniem pomiarowym. Właściwa wartość prądu uzwojenia kompensującego odpowiada największej wartości napięcia indukowanego w takim układzie połączeń. W badaniach istotne jest wyrównanie faz początkowych prądu uzwojenia magnesującego i kompensacyjnego. W tym celu do obwodu wprowadzany jest indukcyjny przesuwnik fazowy. Dopasowanie warunków

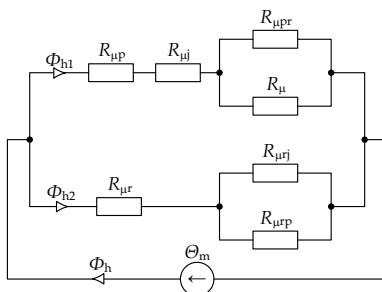


pomiaru do własności aparatu polegało na określeniu dodatkowych napięć magnetycznych, w prowadzonych do obwodu magnetycznego przez elementy konstrukcyjne permeametru. W celu określenia elementów uproszczonego modelu obwodowego, sporządzono symulację w dwuwymiarowym układzie kartezjańskim (Rys. 3). Modelowanie to nie oddało ilościowej informacji o rozkładach indukcji magnetycznej. Miało jedynie jakościowo przybliżyć orientacyjny przebieg linii strumienia magnetycznego. Symulację przeprowadzono w płaszczyźnie przecięcia permeametru przez jarzmo zamykające. Na obszarze rozwiązania zaznaczono cztery charakterystyczne segmenty: A : linie strumienia magnetycznego zamykane poprzez jarzmo i badany pasek blachy; B : linie strumienia magnetycznego zamykane poprzez próbkę, przestrzeń okna i jarzmo; C: linie strumienia magnetycznego zamykane poprzez przestrzeń powietrza oraz jarzmo; D: linie strumienia magnetycznego zamykane tylko poprzez powietrze [5].



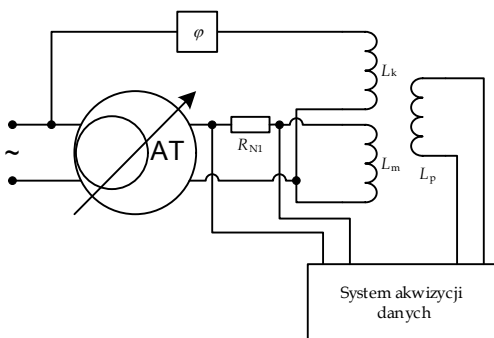
Rys. 9.2.3. Linie strumienia magnetycznego uzyskane za pomocą uproszczonej symulacji dwuwymiarowej metodą elementów skończonych

Konstrukcja permeametru nie jest idealna. Jako obiekt rzeczywisty wykazuje niejednorodności geometrii, szczególnie na płaszczyznach styku jarzma i próbki. W modelowaniu uwzględniono średnią szczelinę powietrzną o grubości  $l_{sz}=10^{-4}$  m.



Rys.9.2. 4. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego jarzma Hopkinsona

Na rysunku (Rys. 9.2.4) przedstawiono analogię elektryczną obwodu magnetycznego. Schemat wyróżnia dwie główne gałęzie, odpowiadające drodze strumienia głównego  $\Phi_h$  (wytworzanego w cewce magnesującej): ze strumieniem  $\Phi_{h1}$  dla linii przechodzących przez okno cewki pomiarowej; ze strumieniem  $\Phi_{h2}$  dla linii zamykających się poza oknem cewki pomiarowej. Uproszczenie polegające na rozdzieleniu gałęzi strumienia magnetycznego, możliwe było dzięki zastosowaniu obliczenia wartości natężenia pola magnetycznego na podstawie prądu cewki magnesującej. Istotną z punktu widzenia obliczeń indukcji magnetycznej w próbce jest gałąź strumienia  $\Phi_{h1}$ , dla której wyróżniono następujące elementy pasywne:  $R_{\mu p}$  – reluktancja szczeliny powietrznej zestyku testowanego paska blachy oraz jarzma;  $R_{\mu j}$  – reluktancja jarzma;  $R_{\mu pr}$  – reluktancja dla strumienia rozproszonego obejmowanego przez cewkę pomiarową;  $R_{\mu}$  – reluktancja testowanego paska blachy [5].



Rys. 9.2.5. Schemat układu połączeń jarzma Hopkinsona; AT – autotransformator,  $\phi$  – indukcyjny przesuwnik fazowy,  $L_m$  – uzwojenie magnesujące,  $L_k$  – uzwojenie kompensujące,  $L_p$  – uzwojenia cewki pomiarowej

$$\phi(t) = -\frac{1}{N} \int e(t) dt \quad (9.2.3)$$

Wymuszając oddziaływanie pola magnetycznego na próbkę, obserwacji poddaje się chwilowe wartości strumienia magnetycznego. Wykonuje się to poprzez pomiar napięcia indukowanego w uzwojeniu pomiarowym (3). Szczegóły wykonania cewki pomiarowej wymusiły uwzględnienie poprawki związanej z reluktancją  $R_{\mu pr}$ . Przekrój poprzeczny cewki obliczono na podstawie średnich rozmiarów karkasu oraz nawiniętych na nim uzwojeń. Uwzględniając, że pole magnetyczne jest jednorodne, zgodnie z I prawem Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych, podział strumienia magnetycznego dla reluktancji  $R_{\mu pr}$  oraz  $R_{\mu}$  uzależniony jest od stosunku ich wartości. Strumień przepływający przez badaną próbkę należy wyznaczyć na podstawie różnicy strumieni: zmierzonego w cewce pomiarowej i wyznaczonego na podstawie natężenia pola magnetycznego, przechodzącego przez cewkę pomiarową poza obszarem próbki ().

$$b(t) = -\frac{1}{NS_p} \int e(t) dt - \frac{\mu_0 h(t)}{S_p} (S_c - S_p) \quad (9.2.4)$$

W zależności (9.2.4) oznaczono:  $S_c$ ,  $S_p$  pole przekroju odpowiednio cewki pomiarowej i próbki. Stała wartość powierzchni przekroju poprzecznego oraz jednorodny rozkład natężenia pola magnetycznego wzdłuż całej długości próbki, pozwala na obliczanie wartości indukcji adekwatnej do zmian mierzonej siły elektromotorycznej.

Układ pomiarowy zasilany jest z rzeczywistego źródła napięcia sinusoidalnie zmiennego. Uwzględniając wymogi norm (P N-EN 60404 -2:2003 „Materiały magnetyczne -- Część 2: Metody pomiaru własności magnetycznych stalowych blach i taśm elektrotechnicznych przy użyciu aparatu Epsteina”), dotyczące odkształcenia sygnału odpowiedzi (nie większy od 1,1%), zadbano, aby współczynnik kształtu zbliżony był do 1,11. Poprawę tego współczynnika można uzyskać dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu toru prądu lub poprzez zastosowany w systemie algorytm kształtowania sinusoidy.



Rys. 9.2.6. Ekran systemu komputerowego do pomiaru właściwości blach elektrotechnicznych permeametrem Hopkinsona

System pomiarowy z zastosowanym permeametrem Hopkinsona, zbudowano w celu określania parametrów materiałów ferromagnetycznych oraz wartości dyskretnej funkcji wagi modelu Preisacha. Na rysunku (9.2.6) przedstawiono ekran graficzny systemu, skonstruowanego w środowisku LabView. W zależności od sposobu jego wykorzystania, zasilanie układu powinno być zbliżone kształtem do przebiegu sinusoidalnego lub wręcz przeciwnie, w miarę możliwości silnie odkształcone (niezbędne do wzorcowania funkcji wagi modelu Preisacha) [9].

Założeniem projektowym aplikacji było wyznaczenie podstawowych parametrów pasków blachy elektrotechnicznej. Do określenia przebiegu indukcji

oraz natężenia pola magnetycznego, wykorzystano dane z napięciowego toru pomiarowego wielofunkcyjnej karty pomiarowej. Przetwarzanie sygnału wykonano za pomocą oprogramowanego komputerowego systemu pomiarowego. Głównym problemem w realizacji unormowanych badań było zasilenie układu napięciem sinusoidalnym. Wykorzystano algorytm formowania sinusoidy, którego aplikacja wymagała zastosowania wzmacniacza mocy o charakterystyce źródła napięcia. W celu zdefiniowania stanu nasycenia próbki, opracowano algorytm wykrywania przyrostu amplitudy natężenia pola magnetycznego oraz amplitudy indukcji magnetycznej. Uzyskana zależność kształtująca charakterystykę rozgałęzioną umożliwiła obliczenie tangensa kąta nachylenia stycznej do osi odciętych. Gdy w kilku kolejnych krokach osiągał on wartości liczbowe poziomu przenikalności próżni, system uznawał wprowadzenie próbki w stan nasycenia. Po uzyskaniu stanu nasycenia określono badanie sygnałów dla przypadku zdefiniowanego zależnością (9.2.5).

$$\begin{cases} H_k = h(t) \Big|_{b(t)=0} \\ B_r = b(t) \Big|_{h(t)=0} \end{cases} \quad (9.2.5)$$

Kontrola w funkcji czasu pozwoliła na uzyskanie informacji o wielkości natężenia koercji  $H_k$  oraz o wartości remanencji  $B_r$ . Badania próbek ferromagnetycznych są wykonywane w celu określenia nie tylko parametrów statycznych czy dynamicznych, lecz również dla określenia wartości strat przy częstotliwości  $f$  pola magnesującego. Podstawową zależność definiującą stratność w próbce o gęstości  $\rho_{Fe}$  przedstawiono w postaci równania (9.2.6).

$$\begin{cases} H_k = h(t) \Big|_{b(t)=0} \\ B_r = b(t) \Big|_{h(t)=0} \end{cases} \quad (9.2.6)$$

Program, s konstruowany dla potrzeb laboratorium, po dzieleniu na kilka bloków systemowych. Pierwszy dotyczył sposobu pobierania sygnału przez przetwornik analogowo-cyfrowy. Określono w nim sposób odczytywania danych z przetwornika, częstotliwość próbkowania oraz rozmiary bloku danych pobieranych z bufora karty. Blok konstrukcji kanału wirtualnego posiada istotne znaczenie dla szacunkowego określenia błędu pomiarowego. Szczególnie, problem dotyczy wprowadzenia liczbowej wartości zakresu pomiarowego dla używanego kanału. Widomo, że dla zastosowanego 16 bitowego przetwornika, kwantyzacja wartości chwilowych, decyduje o interpolacji przebiegu sygnału.

Pomiar jest poznawczym procesem pozyskiwania informacji o obiekcie lub o obserwowanym zjawisku. Zbiór zebranych danych umożliwia konstrukcję uogólnionego opisu rzeczywistości. Proces obserwacyjny - pomiar w ujęciu badawczym - określony zostaje poprzez uproszczone metody eksperymentalne, umożliwiające ograniczony dostęp do atrybutów zjawiska bądź obiektu. Niepewność obserwacji wynika z błędów aparatury, błędów metody, zakłóceń

oraz posiadanych wiadomości o zjawisku, bądź obiekcie. Badania właściwości magnetycznych, należą do grupy badań empirycznych, obarczonych dużą niepewnością pomiaru [15].

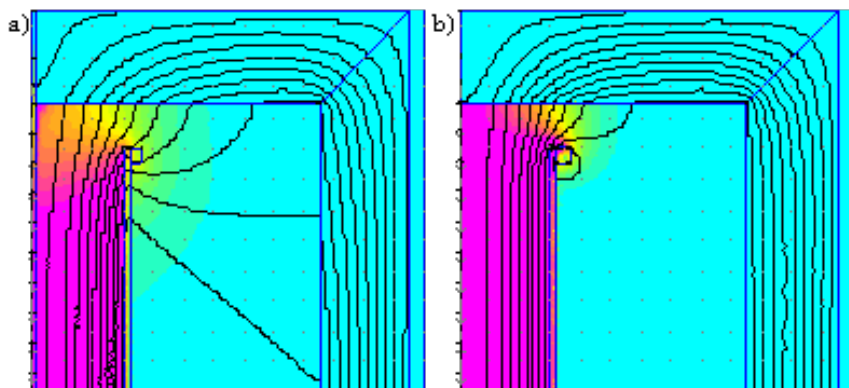
Stosowany permeametr Hopkinsona jako urządzenie do badania właściwości otwartych próbek ferromagnetycznych o określonej konstrukcji, jest również źródłem następujących błędów:

Występowanie w obwodzie magnetycznym dodatkowych reluktancji (Rys. 9.2.4). W obwodzie magnetycznym wartość indukcji  $B$  ściśle związana jest z całkowitą reluktancją próbki oraz jarzm zamykających strumień magnetyczny. Dzięki zastosowanej konstrukcji, stosunek liczbowy przekrojów poprzecznych tych elementów wynosi przynajmniej 1:200, zaś średnia droga strumienia magnetycznych 2:1. Ponadto ze względu na różne punkty pracy na charakterystyce rozgałęzionej (zależne od wartości strumienia magnetycznego), przyjęto, że błąd dodatkowy, wynikający ze spadków napięć magnetycznych w jaramach, zamykających strumień magnetyczny nie przekracza wartości 1,0 %; Nierównomierność rozkładu pola magnetycznego w przestrzeni otaczającej próbkę. Na rysunku (Rys. 9.2.7) przedstawiono jakościowy rozkład natężenia pola magnetycznego w otoczeniu permeamtru. Uwidoczniono (Rys. 9.2.7a) powiększoną niejednorodność dla przypadku braku prądu w uzwojeniu kompensującym oraz jego wyrównanie dla jednakowej gęstości w uzwojeniu magnesującym i kompensującym (Rys.9.2.7b). Odpowiednie dobranie prądu w uzwojeniach kompensujących umożliwiło przyjęcie uproszczenia, że badana próbka została umieszczona w polu jednorodnym [5].

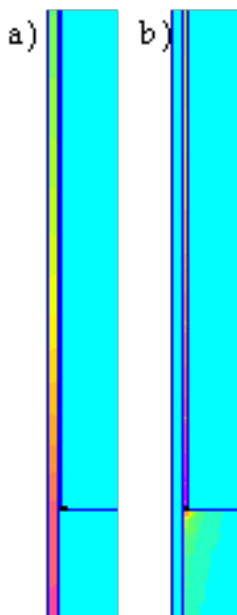
Na granicy powierzchni zestyku badanej próbki oraz jarzm zamykających strumień magnetyczny występują cztery szczeliny powietrzne. Powoduje to znaczny wzrost reluktancji wypadkowej. Fakt niejednorodności powierzchni zestyku od strony jarzma powoduje, że jej wartość jest trudna do oszacowania. Wobec powyższego przyjęto kalkulację błędu uwzględniającą obecność szczeliny powietrznej;

Niejednorodność rozkładu indukcji magnetycznej w pasku blachy w obszarach z estyku. Na rysunku (Rys. 9.2.8) przedstawiono w ynik dwuwymiarowej symulacji. Rezultaty obliczeń potwierdzają niejednorodność rozkładu indukcji magnetycznej w pasku w obszarze zestyku. Dodatkowo powiększone lokalnie natężenie pola magnetycznego w okolicach jarzma może być powodem wzrostu reluktancji.

W z budowanym układzie pomiarowym, zastosowano cyfrowy system akwizycji danych, zbudowany z 16 bitowych wielofunkcyjnych kart pomiarowych NI P CI 6251, k tórego pod stawowym el ementem j est pr zetwornik ana logowo-cyfrowy. Analizując podstawowe zasady wyznaczania maksymalnego progu błędu, skoncentrowano uwagę na następujących grupach: Błąd statyczny - kategoria zawiera wszystkie odchylenia wartości sygnału wejściowego przetwornika od wartości rzeczywistej. Uwzględniając hybrydową strukturę systemu, wartość tego odchylenia sumuje wszystkie błędy składowe elementów wchodzących w skład przyrządów pomiarowych. Błąd przypadkowy - kategoria grupuje odchylenia wyniku pomiaru, spowodowane kwantowaniem sygnału oraz sygnałami zakłócającymi. Błąd dynamiczny - kategoria ta zawiera wszystkie odchylenia spowodowane szybkimi zmianami wartości mierzonej [15].



Rys. 9.2.7. Rozkład linii natężenia pola magnetycznego w przestrzeni permeamtru:  
a) zerowa wartość gęstości prądu kompensującego, b) jednakowa wartość gęstości prądu kompensującego i magnesującego



Rys.9.2.8. Przestrzeń zestyku testowanego paska z jarzmem zamykającym: a) moduł indukcji magnetycznej, b) moduł natężenia pola magnetycznego

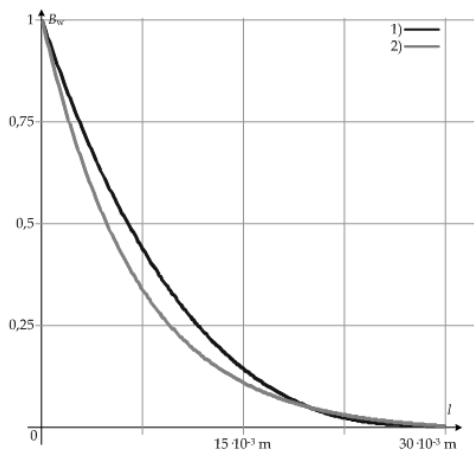
Istotnym pr obłem j est stan początkowy próbki. Wystąpienie namagnesowania szczątkowego może być powodem błędnej interpretacji wyniku

końcowego. W przypadku małych zmian prądu magnesującego, remanencja powoduje odkształcenie obserwowanej pętli histerezy. Przetwornik indukcyjny, jakim jest cewka pomiarowa, umożliwia obserwację jedynie zmian strumienia magnetycznego. Podmagnesowanie może wprowadzać znaczący, trudno obserwowalny błąd systematyczny. W układzie pomiarowym problem rozwiązano poprzez wstępne rozmagnesowanie próbki.

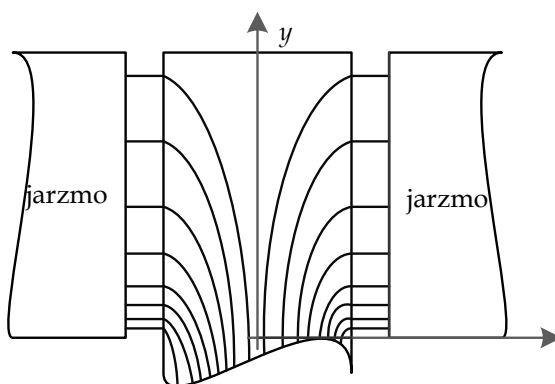
Na (Rys. 9.2.5) przedstawiono schemat połączeń aparatu Hopkinsona. Do pomiaru wartości natężenia pola magnetycznego, zastosowano rezystor pomiarowy o wartości  $R_{N1}=1\ \Omega$ , z podaną tolerancją  $\Delta R_{N1}=1\%$ . Przyjęto niezmiennosc parametrów rezystora w zakresie pomiarowym  $0\div3\text{ A}$ . Napięcia na zaciskach rezystora  $R_{N1}$ , wprost proporcjonalne do wartości natężenia prądu, stanowi miarę wartości natężenia pola magnetycznego wewnątrz cewki magnesującej. Nierównomierny rozkład pola magnetycznego na krańcach cewki kompensowano uzwojeniami  $L_k$ , dla których przyjęto pomijalny wpływ na wartość błędu. Ze względu na całkowity błąd pomiaru w permeametrze istotne są przedziały niepewności:  $\Delta R_{N1}$ ,  $\Delta r_{sr}$  i  $\Delta I$ . Liczbowe ich wartości są podane przez producenta lub zależą od dokładności przyrządu pomiarowego. Wybrany zakres pracy karty nie wpływa na wymienione parametry.

Ze względu na metodę pomiarową, ważnym jest określenie błędu pomiaru przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Pomiar w przedziale napięcia  $-10\text{ V}\div10\text{ V}$  sumuje dwa rodzaje błędów: błąd przetwornika, związany z szumami, temperaturą, wzmocnieniem, podany przez producenta karty wynosi  $\Delta u_{ac1}=1,92\cdot10^{-3}\text{ V}$  oraz uchyb kwantyzacji  $u_{ac2}$ , wyznaczony na podstawie rozdzielczości karty.

Przeprowadzone analizy błędów pozwoliły oszacować jego maksymalny błąd całkowity wyznaczania wartości natężenia pola magnetycznego, który wynosi  $\varepsilon_h=3,94\%$ .



Rys. 9.2.9. Rozkład względnej indukcji magnetycznej na powierzchni testowanego paska na brzegu obszaru szczeliny powietrznej: 1) krzywa określona na podstawie danych symulacyjnych; 2) krzywa aproksymowana funkcją wykładniczą



Rys.9.2.10. Rozkład linii strumienia magnetycznego w pasku blachy w przestrzeni szczeliny powietrznej; czerwoną linią zaznaczono powierzchnię dla których przyjęto jednakowe napięcie magnetyczne

Istotnym problemem przy szacowaniu dokładności permeametry jest zbadanie prądów w otworach szczelin powietrznych. W konstrukcji wyróżniono je cztery, które umieszczone na schemacie obwodowym występują parami szeregowo i wzajemnie do siebie równolegle. Położenie ich w obwodzie (Rys. 9.2.5) świadczy, że udział wnoszonych reluktancji może być znaczący przy pomiarze indukcji w testowanym pasku blachy. Na rysunku (Rys. 9.2.10) przedstawiono poglądowy szkic rozptyłu strumienia magnetycznego. Szczelina powietrzna wprowadza dużą, a w przypadku przyjęcia równomiernej powierzchni, stałą do oszacowania reluktancję  $R_{up}$ . Trudniejszym do analizy jest przypadek nierównomiernego rozptyłu strumienia magnetycznego w samym pasku blachy. Na rysunku (Rys. 9.2.9) przedstawiono wynik symulacji rozkładu indukcji magnetycznej na powierzchni testowanego paska na granicy obszaru szczeliny powietrznej. Przy pomocy aproksymacji określono funkcję rozkładu indukcji na powierzchni wzdłuż paska (0Y), gdzie  $ah$  oznacza współczynnik dobierany metodą aproksymacji. Dodatkowym, wprowadzonym do rozważań uproszczeniem było określenie dwóch powierzchni ekwipotencjalnych. Na rysunku (Rys. 10) oznaczono je liniami czerwonymi.

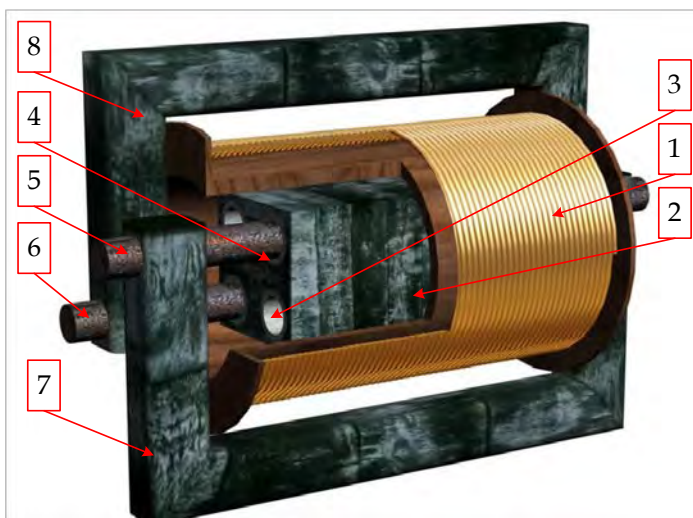
### 9.2.3. Badania defektoskopowe

Praca nad identyfikacją parametrów modelu charakterystyki rozgałęzionej oraz nad zastosowaniem algorytmów sztucznych sieci neuronowych w modelowaniu obwodów magnetycznych, doprowadziła do opracowania metody jakościowej klasyfikacji materiałów w grupach podobieństwa. Jako wzorzec klasyfikujący przyjęto funkcję wagi modelu Preisacha oraz różnicową funkcję wagi, które pozyskiwane są na podstawie danych eksperymentalnych [7, 8, 10].



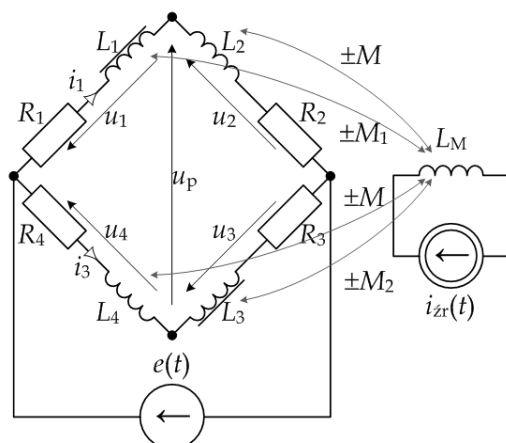
W celu pozyskania danych do różnicowej funkcji wagi zbudowano defektoskop (Rys. 9.2.11) do badań walcowych próbek ferromagnetycznych z wzorcem. Do klasyfikacji danych zastosowano algorytmy wielowarstwowych sztucznych sieci neuronowych. W ten sposób wykorzystano ich własność polegającą na możliwości grupowania obiektów w klasach podobieństwa. [16, 17, 18].

Zbudowane urządzenie służy do badania nieciągłości struktury detali ferromagnetycznych, które zbudowano z dwóch niezależnych jarzm (Rys. 9.2.12). Magnesowanie próbek następuje w wyniku wzbudzenia siły magnetomotorycznej cewki magnesującej o przekroju kołowym. Wewnątrz niej umieszczono elementy ferromagnetyczne, ekran magnetyczny oraz cewki układu pomiarowego. Wewnątrz cewki magnesującej (1) znajduje się ekran magnetyczny (2), zbudowany z blach elektrotechnicznych w kształcie prostopadłościanu o podstawie kwadratowej lub o kształcie wypełniającym przekrój poprzeczny cewki magnesującej, z wydrążonymi czterema otworami (3). W każdym z nich umieszczono jednakowe cewki pomiarowe (4). W dwóch cewkach pomiarowych znajdują się: detal wzorcowy (5) i badany (6), które są połączone jarzmami (7) i (8) zamykającymi strumień magnetyczny.



Rys. 9.2.11. Budowa defektoskopu

Głównym zadaniem urządzenia do badania nieciągłości jest pomiar napięcia nierównowagi mostka. Konstrukcja dwóch niezależnych jarzm ułatwia przepływ strumienia magnetycznego przez wzorec i przez badany detal. Jednakowe ich właściwości uznano za konieczne do utrzymania stanu równowagi [13]. Algorytm badania przewiduje dowolne przemieszczanie się detalu badanego wewnątrz jednej z cewek [21].



Rys. 9.2.12. Schemat układu defektoskopu

Na rysunku (Rys. 9.2.12) przedstawiono schemat połączeń mostka zmiennoprądowego. Układ składa się z czterech gałęzi z elementami RL oraz źródła napięcia sinusoidalnie zmiennego. Ramiona mostka w stanie pracy bez udziału sprzężeń (brak prądu w cewce magnesującej) są gałęziami pasywnymi. Dla wartości prądu  $i_{zr}(t) \neq 0$  układu mostka staje się aktywny poprzez wprowadzenie sprzężeń magnetycznych pomiędzy cewką magnesującą wzorzec i badaną próbką z cewkami wchodzącymi w skład ramion mostka. W trakcie analizy pracy układu z gałęziami aktywnymi, parametry te modyfikowano w celu zbadania wpływu ich wartości na czułość mostka.

W celu zapewnienia jednakowego rozkładu pola magnetycznego w cewkach i wyeliminowania sprzężeń cewek mostka, zastosowano ekran magnetyczny. Efekt jego oddziaływania w przestrzeni badano poprzez symulację przeprowadzoną metodą elementów skończonych. Etap ten określił głównie poglądowy obraz rozkładu indukcji magnetycznej w zadanym obszarze.

Szczegóły układu (Rys. 9.2.12) uwiadcniają poszczególne cewki mostka zmiennoprądowego skojarzone z cewką magnesującą [5, 20].

$$\begin{cases} u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dL_1}{dt} \pm \left( M_1 \frac{di_{zr}}{dt} + i_{zr} \frac{dM_1}{dt} \right) \\ u_2 = i_1 R_2 + L_2 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_{zr}}{dt} \\ u_3 = i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + i_3 \frac{dL_3}{dt} \pm \left( M_2 \frac{di_{zr}}{dt} + i_{zr} \frac{dM_2}{dt} \right) \\ u_4 = i_3 R_4 + L_4 \frac{di_3}{dt} \pm M \frac{di_{zr}}{dt} \end{cases} \quad (9.2.7)$$

Na podstawie układu równań (9.2.7) oraz zależności na napięcia w poszczególnych gałęziach, przy założeniu, że wzorec i badana próbka przechodzi przez prześwit cewek  $L_1$  oraz  $L_3$ , otrzymano wartość napięcia niezrównoważenia  $u_p$  (9.2.8) [5, 20].

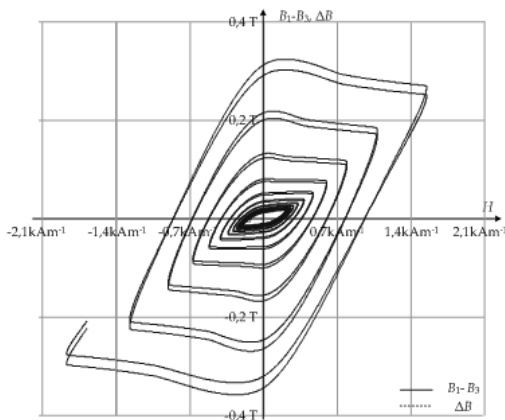
$$u_p \approx \frac{i_{\dot{zr}} \left( \pm \frac{dM_1}{dt} \mp \frac{dM_2}{dt} \right) + \frac{di_{\dot{zr}}}{dt} (\pm M_1 \mp M_2)}{2} \quad (9.2.8)$$

Znaczący pod względem pomiarowym jest człon zawierający sprzężenia magnetyczne  $M_1$  oraz  $M_2$ . Uzyskane w równaniu (9.2.8) przybliżenie umożliwia przedstawienie zmian napięcia nierównowagi w postaci równania (9.2.9), uwzględniającego postać funkcji złożonej różnicy strumienia magnetycznego wzorca  $\Psi_1$  i próbki  $\Psi_3$  [5, 20].

$$u_p \approx \frac{1}{2} \frac{d(\Psi_1' - \Psi_3')}{dt} \quad (9.2.9)$$

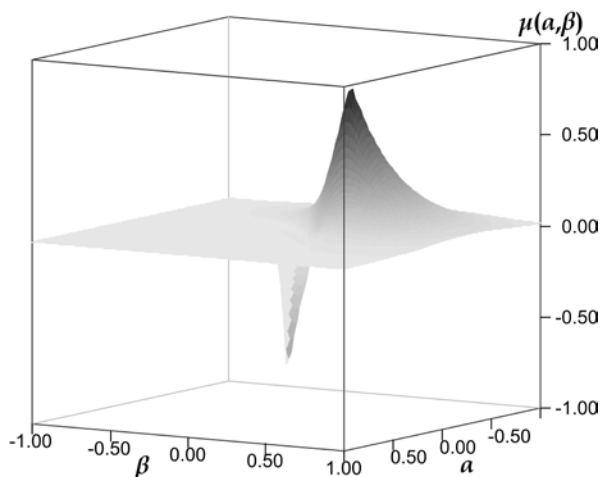
Z zależności (9.2.8) wynika proporcjonalna wartość napięcia nierównowagi mostka do wartości zmian różnicy strumieni  $\Psi_1$  oraz  $\Psi_3$  w cewkach  $L_1$  i  $L_3$ . Obserwacja tej wielkości stanowiła punkt wyjścia przy tworzeniu wirtualnego obrazu wady materiałowej. Analiza odpowiedzi układu na wymuszenie prądem zmiennym (9.2.10) pozwoliła na określenie postaci różnicowej charakterystyki rozgałęzionej (Rys. 9.2.13), dla odpowiednio zadanych wartości pulsacji  $\omega$  oraz współczynnika tłumienia  $\tau$ .

$$i_{\dot{zr}}(t) = I_m e^{-\tau t} \sin(\omega t) \quad (9.2.10)$$



Rys. 9.2.13. Przyrostowa charakterystyka różnicowa

Koncepcję pracy układu badawczego zaczerpnięto z metod wzorcowania funkcji wagi modelu Preisacha. Różnicą było określenie portretu wady w postaci statycznej histerezy (Rys. 9.2.14) na podstawie zmian wartości napięcia nierównowagi mostka [5, 20]. Uzyskano w ten sposób postać funkcji, traktowanej jako wielowymiarowy obiekt podlegający identyfikacji oraz klasyfikacji [16, 17, 18, 20].



Rys. 9.2.13. Różnicowa statyczna histereza

Zadaniem postawionym algorytmom sztucznych sieci neuronowych było klasyfikowanie w grupach podobieństwa, analogiczne do technik rozpoznawania obrazów. Zastosowanie takiej metody identyfikacji materiału magnetycznego przy pomocy statycznej histerezy miało na celu zastąpienie pracochłonnego, sekwencyjnego porównywania cech dynamicznych oraz metod statystycznych [16, 17, 18, 20].

#### 9.2.4. Wnioski

Przedstawione aspekty prac badawczych stanowią skrótową syntezę badań nad aplikacjami modeli matematycznych oraz neuronowo-rozmytych w połączeniu z identyfikacją ich parametrów. Poszukiwania uogólnień obrazu rzeczywistości, sprowadzają się do dyskusji nad wielowymiarową interpretacją charakterystyk materiału ferromagnetycznego. Szczególną uwagę zwraca się na modele histerezy magnetycznej. Wynikały stąd podejmowane dyskusje nad modelami: Isinga, Curie-Weissa, Preisacha oraz Jilesa-Athertona. Poszukiwano w nich możliwości aplikacji perceptronów wielowarstwowych lub genezy zastosowań fundamentalnych krzywych aproksymujących.

Analiza funkcji wagi oraz podstawowych jej własności umożliwiły stworzenie koncepcji pracy, dotyczącej zastosowania algorytmów sztucznych sieci neuronowych. Skupiono uwagę na jej postaciach oraz wpływie jej

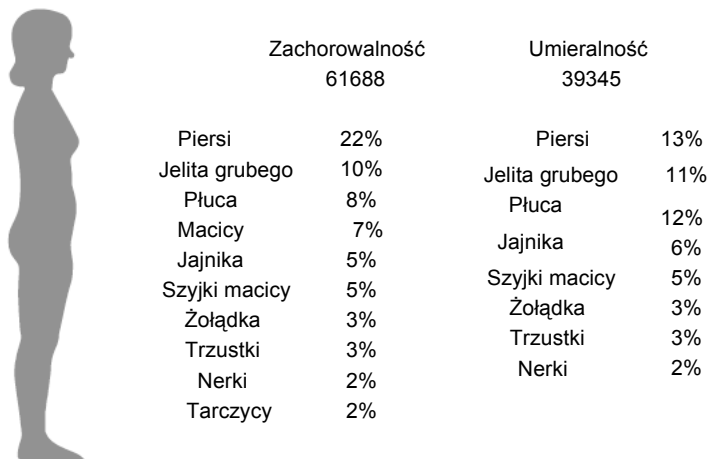
powierzchni na przebieg zamkniętej, granicznej pętli histerezy. Umożliwiły one analizę kształtu charakterystyk wynikowych. Uzyskane rezultaty posłużyły do przygotowania podstawowych kryteriów przy budowie algorytmu neuronowego.

Przedstawione aspekty środowisk pomiarowych, s zcześnie do wzorcowania funkcji wagi dla permeametry Hopkinsona umożliwiły badania kształtów powierzchni dla materiałów magnetycznych. Wykorzystano do tego nowoczesne techniki kolekcji danych. Skonstruowano aplikacje w środowisku LabView do badań magnetycznych. Zastosowana technika programowania wizualnego umożliwiła zaprojektowanie uniwersalnego systemu, który po nieznacznych modyfikacjach został użyty do badań defektoskopowych i do badań podstawowych urządzeń (transformatory i dławiki).

### 9.3. Mikrofalowe obrazowanie raka piersi przy użyciu metody FDTD

#### 9.3.1. Wprowadzenie

Nowotwory złośliwe stanowią istotny problem nie tylko w starszych grupach wiekowych, ale są główną przyczyną przedwczesnej umieralności przed 65 rokiem życia. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w populacji kobiet. Według danych z najnowszego raportu Krajowej Bazy Danych Nowotworowych najczęściej występujące u kobiet nowotwory złośliwe to: rak sutka (13 322, czyli 21,51% zachorowań), rak oskrzela i płuca (5 075, czyli 8,2%), rak trzonu macicy (4 376 czyli 7%), nowotwory skóry inne niż czerniak (4 306 czyli 6.8%), rak jajnika (3 291 czyli 5%) oraz rak szyjki macicy (3 226czyli 5%)[35].



Rys. 9.3.1 Liczba zachorowań i zgonów na nowotwory złośliwe wśród kobiet w Polsce w 2007 .

Podstawową metodą zmniejszenia umieralności jest wczesne wykrywanie tego nowotworu w ramach prawidłowo zaplanowanych i realizowanych badań.

### 9.3.2. Metody diagnostyki medycznej

Metody diagnostyczne powszechnie stosowane w medycynie to:

#### 1) Mammografia

technika oparta na promieniowaniu X, wyspecjalizowana wyłącznie do obrazowania piersi u kobiety, pozwalająca na odróżnienie poszczególnych struktur oraz zmian patologicznych w gruczole piersiowym.

Zastosowanie pierwszych mammografów miało miejsce w drugiej połowie lat 60. ubiegłego wieku [31]. Pomimo wprowadzenia nowoczesnych lamp rentgenowskich o wysokiej rozdzielczości, według wielu doniesień mammografia RTG (Radioizotopowy generator termoelektryczny) nadal może dawać ok. 40% tzw. fałszywych pozytywnie wyników [7, 9]. Główną przyczyną takiego stanu jest problem z wyodrębnieniem zmian chorobowych na tle gęstego utkanka piersi (>75% tkanki gruczolowej), które jest typowe dla młodych kobiet [27]. Poza tym niewielkie różnice w wartościach współczynników absorpcji dla tkanki zdrowej i dotkniętej zmianami patologicznymi są przyczyną obniżonego kontrastu [31]. Kolejną przyczyną, z powodu której nie poleca się mammografii kobietom poniżej 40. roku życia, jest fakt, że tkanka piersi wykazuje dużą wrażliwość na możliwość indukcji nowotworu w wyniku działania promieniowania X [31].

#### 2) Ultrasonografia (USG)

– jest nieinwazyjną metodą diagnostyczną, pozwalającą na uzyskanie w czasie rzeczywistym obrazu przekroju badanego obiektu. Metoda ta oparta jest na falach ultradźwiękowych o długości ok. 1–2 mm i częstotliwości od 2 do 16 MHz. Podstawą tej metody jest zjawisko występowania echa na granicy dwóch struktur [31]. Fala ultradźwiękowa odbita na granicy dwóch ośrodków o różnej impedancji akustycznej jest źródłem informacji o stanie danego narządu czy określonej przestrzeni wewnątrz ciała osoby badanej. Uzyskany obraz zawiera jedynie zarysy tkanek, natomiast brak informacji o ich właściwościach.

#### 3) Rezonans magnetyczny (MRI)

zastosowany jako metoda diagnostyki medycznej w roku 1980 zyskał miano największego osiągnięcia w dziedzinie diagnostyki obrazowej. W tej technice wykorzystuje się trzy pola magnetyczne, między innymi pole służące do ukierunkowania momentów magnetycznych protonów, które jest polem stałym o indukcji magnetycznej 0.2–2.5 [T] [31].

W rezonansie magnetycznym wykorzystano promieniowanie γ pochodzące z atomów wodoru (63%). Różne tkanki mogą być identyfikowane dzięki różnym czasom relaksacji.

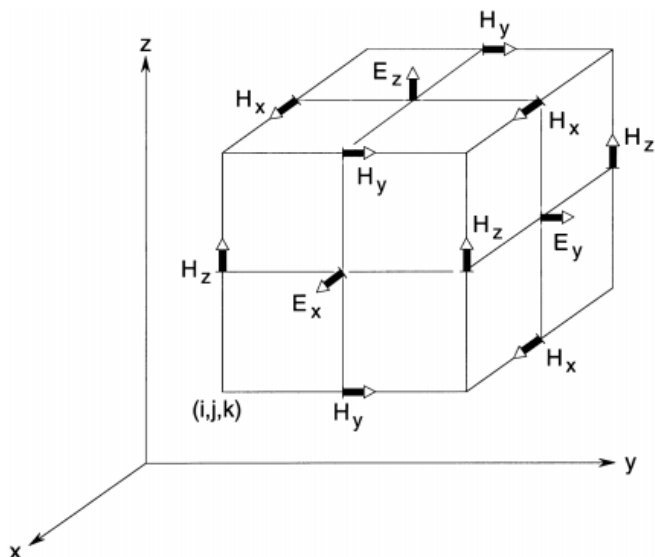
W Polsce badanie MRI jest wykonywane jedynie w szczególnych przypadkach:

- niejednoznaczna ocena guzka w konwencjonalnych metodach obrazowania (mammografia, USG),
- staging przedoperacyjny (wykluczenie wieloogniskowej postaci raka),
- ocena sutka po zabiegach oszczędzających,
- ocena sutka po zabiegach ze wszczepieniem implantu,
- monitorowanie odpowiedzi na chemioterapię,
- genetyczne skłonności wystąpienia raka piersi,
- badania przesiewowe u pacjentek nosicielek genu BRCA.

Niejednoznaczna ocena guza w wymienionych metodach (mammografia, MRI, USG) obrazowana jest jedynie dla zmian określonych jego wymiarem między 5–10 mm [33]. Jak ważne są metody diagnostyczne i w czasie rozpoznawanie chorób można przekonać się, analizując dane statystyczne dotyczące zachorowalności i umieralności kobiet na raka piersi. Dlatego ciągle poszukuje się nowych sposobów wspomagających wymienione metody diagnostyki w medycynie.

### 9.3.3. Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. Finite Difference Time Domain)

Metoda Finite Difference Time Domain (FDTD) zaproponowana po raz pierwszy w 1966 roku przez K. Yee [36] jest prostym i efektywnym sposobem numerycznego rozwiązywania równań Maxwella. Polega na bezpośrednim całkowaniu w dziedzinie czasu i przestrzeni równań Maxwella w zapisie skalarnym dla każdej ze składowych: elektrycznej  $E$  i magnetycznej  $H$ . W przestrzeni trójwymiarowej otrzymujemy trzy wektory natężenia pola magnetycznego. Analizowany obszar dzieli się na tzw. komórki Yee, co prowadzi do sformułowania równań Maxwella w postaci różnicowej:



Rys. 9.3.2. Komórka Yee w 3D [29]

Wykorzystywany w metodzie FDTD efektywny sposób zastosowania centralnego schematu różnicowego do równań Maxwella opiera się na siatce Yee (rys. 3.1). Każdemu wektorowi natężenia pola magnetycznego i elektrycznego przypisane są parametry materiału, tj. przewodność  $\sigma$  i przenikalność elektryczna  $\epsilon$  [36].

Stosując notację zaprezentowaną przez Yee [34], do wskazania węzłów komórki elementarnej w punkcie  $P(i, j, k)$  mamy:

$$P(i, j, k) \approx P(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (9.3.1)$$

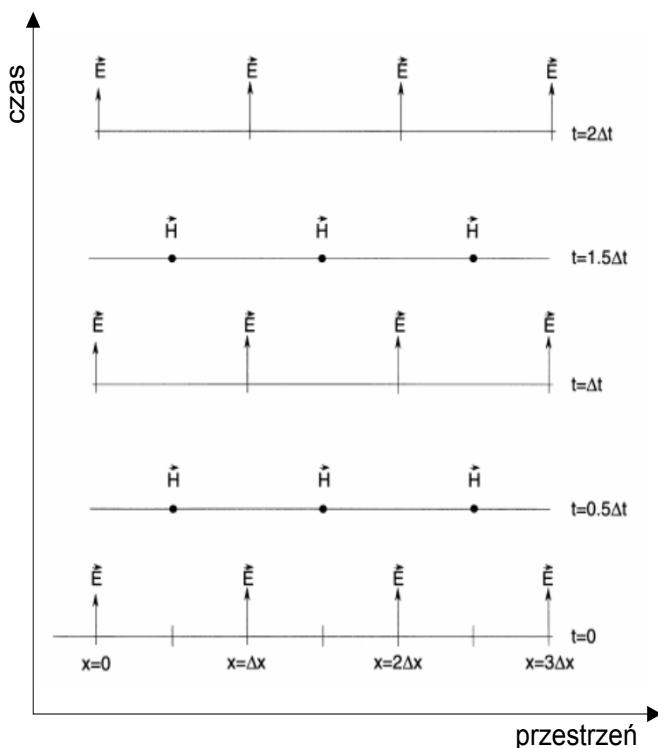
Zapisując dowolną funkcję  $u$  w  $n$ -tym kroku czasowym otrzymujemy:

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{i,j,k}^n \quad (9.3.2)$$

gdzie:

$\Delta t$  to krok czasowy zdeterminowany warunkiem stabilności Couranta,  
 $n$  – liczba całkowita (rys. 9.3.2);

Składowa pola elektrycznego jest przesunięta o pół kroku czasowego względem składowej pola magnetycznego. Takie postępowanie prowadzi do uniknięcia rozwiązania dużych równań macierzowych, co jest główną zaletą tej metody. Bazując na algorytmie Yee, możemy wyprowadzić wzory dla  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ,  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ :



Rys. 9.3.3. Schematyczne przedstawienie algorytmu Yee



(9.3.3)

$$Hx_{i,j,k}^{n+1/2} = \left( \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k}^* \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k}^* \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) Hx_{i,j,k}^{n-1/2}$$

$$+ \left( \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k}^* \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \cdot \left( \frac{Ey_{i,j,k}^n - Ey_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} - \frac{Ez_{i,j+1/2,k}^n - Ez_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} \right)$$

$$Hy_{i,j,k}^{n+1/2} = \left( \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k}^* \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k}^* \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) Hy_{i,j,k}^{n-1/2} + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k}^* \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \cdot \left( \frac{E_{i+1/2,j,k}^n - E_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} - \frac{E_{i,j,k+1/2}^n - E_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta x} \right) \quad (9.3.4)$$

)

$$Hz_{i,j,k}^{n+1/2} = \left( \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k}^* \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k}^* \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) Hz_{i,j,k}^{n-1/2} + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k}^* \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \cdot \left( \frac{E_{i+1/2,j,k}^n - E_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} - \frac{E_{i,j,k+1/2}^n - E_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta x} \right) \quad (9.3.5)$$

)

$$Ex_{i,j,k}^{n+1} = \left( \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) Ex_{i,j,k}^n + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \cdot \left( \frac{H_{i,j,k}^{n+1/2} - H_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right) \quad (9.3.6)$$

$$Ey_{i,j,k}^{n+1} = \left( \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) Ey_{i,j,k}^n + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \cdot \left( \frac{H_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta z} - \frac{H_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) \quad (9.3.7)$$

$$Ez_{i,j,k}^{n+1} = \left( \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) Ez_{i,j,k}^n + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \cdot \left( \frac{H_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{H_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \right) \quad (9.3.8)$$

gdzie:

**H** – wektor natężenia pola magnetycznego o składowych  $H_x, H_y, H_z$  [A/m],**E** – wektor natężenia pola elektrycznego o składowych  $E_x, E_y, E_z$  [V/m],

$\sigma_*$  - konduktywność elektryczna [S/m],  
 $\sigma$  - odpowiednik strat magnetycznych [ $\Omega/m$ ][21].

Równania ( 9.3.3÷9.3.8) umożliwiają obliczenie składowych pola elektrycznego  $E$  i magnetycznego  $H$  na podstawie ich wartości z poprzedniego kroku czasowego, co schematycznie przedstawia rysunek 9.3.2 [34].

### 9.3.3.1. Stabilność numeryczna metody

Warunek stabilności numerycznej algorytmu Yee został wprowadzony przez Taflova [34]. Udowodnił on, że wielkość kroku czasowego  $\Delta t$  jest zdeterminowana rozmiarami komórki elementarnej ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) i prędkości fali  $c$  w rozpatrywanym ośrodku jednorodnym:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (9.3.9)$$

W praktyce o bliczeniowej z akłada się, że rozpatrywany ośrodek jest niejednorodny i przyjmuje się warunek:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{x_{i,j,k}}(\Delta x)^2} + \frac{1}{\varepsilon_{y_{i,j,k}}(\Delta y)^2} + \frac{1}{\varepsilon_{z_{i,j,k}}(\Delta z)^2}}} \quad (9.3.10)$$

gdzie:

$c$  – prędkość rozchodzenia się fali w analizowanym obszarze,  
 $\varepsilon$  – przenikalność elektryczna.

Ponadto przyjmuje się że:

$$\Delta = \lambda / 10 \quad (9.3.11)$$

gdzie:

$\Delta$  – wielkość komórki Yee,  
 $\lambda$  – długość fali w analizowanym ośrodku.

Nieuwzględnienie podanych powyżej parametrów może prowadzić do niestabilności algorytmu.

### 9.3.3.2. Dyspersja numeryczna

Analiza numeryczna zjawiska dy spersji numerycznej na podstawie równań Maxwella sprowadza się do analizy porównawczej prędkości w sensie analitycznym.

$$\mathbf{j}\nabla \times \mathbf{V} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} \quad (9.3.12)$$

gdzie ze względu na harmoniczne pole elektromagnetyczne opisuje wektor falowy w postaci zespolonej:

$$\mathbf{V} = \mathbf{H} + \mathbf{jE} \quad (9.3.13)$$

a równania Maxwella opisane są w formie zespolonej:

$$\mathbf{j}\nabla \times (\mathbf{H} + \mathbf{jE}) = \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{H} + \mathbf{jE}) \quad (9.3.14)$$

Wstawiając wektor falowy opisujący propagację fali:

$$V_i^n = V_o e_k^{(\tilde{k}_x i \Delta x + \tilde{k}_y j \Delta y + \tilde{k}_z k \Delta z - \omega n \Delta t)} \quad (9.3.15)$$

gdzie:

$\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$  - składowe wektora wyrażone numerycznie,

$\omega$  - częstotliwość kątowna,

do równania (9.3.12) i wyrażając go poprzez różnicę zgodnie z algorytmem Yee, otrzymujemy:

$$\left[ \frac{1}{c\Delta t} s \left( \frac{\omega\Delta t}{2} \right) \right]^2 = \left[ \frac{1}{\Delta x} s \left( \frac{\tilde{k}_x \Delta x}{2} \right) \right]^2 + \left[ \frac{1}{\Delta y} s \left( \frac{\tilde{k}_y \Delta y}{2} \right) \right]^2 + \left[ \frac{1}{\Delta z} s \left( \frac{\tilde{k}_z \Delta z}{2} \right) \right]^2 \quad (9.3.16)$$

Równania te redukują się do zależności:

$$\left( \frac{\omega}{c} \right)^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (9.3.17)$$

Analizując równanie (9.3.16), widać, że jeśli  $\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ , dążą do zera, to równanie staje się tożsame z równaniem (9.3.17), co oznacza, że dyspersję można zredukować przez odpowiedni dobór siatki i kroku czasowego [34].

### 9.3.3.3. Absorpcyjny warunek brzegowy

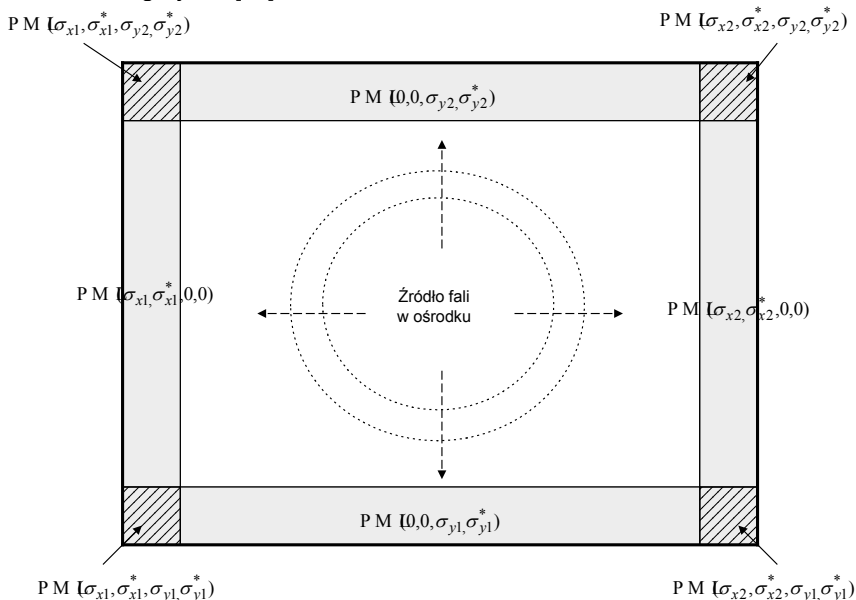
J. P. Berenger [21] zaproponował w 1994 roku całkiem nowe podejście dotyczące zewnętrznych warunków brzegowych. Istota pomysłu Berengera polegała na odcenieniu analizowanego obszaru w środowisku tłumiącym fale elektromagnetyczne, tzw. doskonale dopasowaną warstwą (*ang. Perfectly Matched Layer – PML*). Właściwości warstwy mogą zmieniać się w zależności od kierunku rozchodzenia się fali i być niezależnymi od częstotliwości. Doskonale

dopasowana warstwa (rys.9.3.3) przyjmuje oznaczenie PML ( $\sigma_x, \sigma_x^*, \sigma_y, \sigma_y^*, \sigma_z, \sigma_z^*$ ).

Jeśli warstwa PML ma nie powodować odbić fali, to jej impedancja właściwa na granicy z próżnią musi być równa impedancji właściwej próżni:

$$\frac{\sigma_w}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_w^*}{\mu_0} \quad (9.3.18)$$

Konieczne jest przyjęcie odpowiednich warunków brzegowych, zapewniających uzyskanie poprawnych wyników, a także zapewnienie stabilności algorytmu [21].



Rys. 9.3.3 Struktura warstwy PML

#### 9.3.4. Tomografia mikrofalowa

Zalety tomografii mikrofalowej :

- brak narażenia pacjenta ze strony promieniowania jonizującego,
- jest bezpieczniejszym i bardziej komfortowym badaniem,
- oczekuje się, że będzie tańsza niż badanie MRI i medycyna nuklearna,
- szacuje się że metoda pozwoli wykrywać guzy mniejsze niż za pomocą badania MRI.

Zastosowanie mikrofal było przedmiotem wielu badań dotyczących telefonii komórkowej i hipertermii. Bezpieczne standardy zostały określone za pomocą maksymalnej ekspozycji natężenia pola elektrycznego, magnetycznego i SAR

(ang. *Specific Absorption Rate* ) w organizmach żywych (np. IEEE Standard C95.1-1999) [23]. Postęp w badaniu obrazowania mikrofalowego rozwija się w nauce bardzo szybko. Przewiduję się możliwość wykrywania większości guzów w piersi.

Kluczem do uzyskania czułości, swoistości i zdolność wykrywania małych guzów jest kontrast właściwości elektrycznych między nowotworową i normalną tkanką [23].

Metoda detekcji raka w zakresie mikrofalowym polega na naświetlaniu piersi falą elektromagnetyczną o odpowiedniej częstotliwości i polaryzacji, po czym fala ta jest odbierana przez tę samą antenę lub oddzielną antenę, bądź tablice anten. Kolejno konstruowany jest obraz na podstawie fali elektromagnetycznej transmitowanej lub odbitej od piersi

Wiodącym ośrodkiem naukowym zajmującym się klinicznym systemem wykonywania tomografii mikrofalowej jest Dartmouth College w USA [24]. 32-kanalowy system pracuje w zakresie częstotliwości 500MHz – 3GHz (Rys.9.3.4). Interfejs pacjenta stanowi zbiornik (fantom) z miksturą gliceryny i wody. Odpowiednie stężenie dla wody i gliceryny odnosi się do właściwości elektrycznych dla danej tkanki. Natomiast tło stanowi inne stężenie soli. Zastosowania tła nakreśla modelowy obwód badanej piersi. Tkanka nowotworowa i normalna różni się w składzie substancji proporcją wody. Interfejs odwzorowuje kobietę leżącą twarzą w dół gdzie model piersi jest przetwarzany przez aparaturę do fantomu. 16 pojedynczych anten wystaje nad powierzchnie zbiornika. Anteny muszą być dostatecznie małe aby zostały umieszczone blisko piersi. Są one umieszczone na odpowiedniej wysokości z kontrolującym siłownikiem liniowym w celu odczytu danych z różnych płaszczyzn przekroju piersi [24].

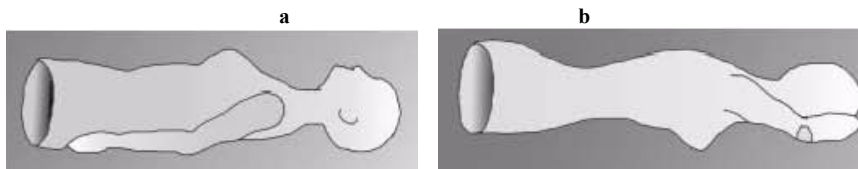


Rys. 9.3.4 System do badania tomografii mikrofalowej w Klinice Uczelnianej Dartmouth [23]

Sygnał jest kolejno nadawany przez każdą antenę i mierzony przez 15 odbiorczych anten w siedmiu pionowych pozycjach. Całkowity czas pomiaru wynosi 14min. Uzyskany obraz stanowi iteracyjny model piersi. Wykonuje się to w celu zminimalizowania błędów między mierzonym polem a numerycznym rozwiązaniem pola elektrycznego. Komputerowe rozwiązanie pola oszacowuje elektryczne właściwości które są uaktualniane w każdej iteracji. Fizyczne właściwości występowania fantomu są odzwierciedlane za pomocą odpowiedniego numerycznego algorytmu. W celu osiągnięcia wymaganej dokładności został zaimplementowany graniczny warunek brzegowy dla promieniowania pola( np. PML o którym była mowa w poprzednim rozdziale). Strategia badań dostosowuje się do strefy obrazu, konturu piersi w celu wzmocnienia właściwości wykrywania guzów [23].

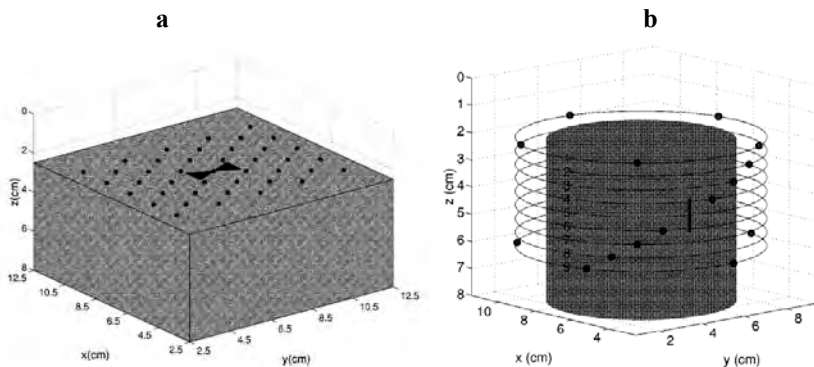
### 9.3.5. Obrazowanie mikrofalowe

W tomografii mikrofalowej można dokonać podziału ze względu na ułożenie pacjentki podczas badania na układ płaski i cylindryczny (rys. 9.3.5.) [30]:



Rys. 9.3.5 Ułożenie pacjentki podczas badania [30]: a) układ płaski, b) układ cylindryczny

W układzie płaskim gruczoł piersiowy skanowany jest za pomocą anten umieszczonych nad jego powierzchnią. W układzie cylindrycznym anteny umieszczone są na około gruczołu piersiowego. W układzie płaskim antena przyłożona jest bezpośrednio do skóry. Natomiast w układzie cylindrycznym antena dipolowa jest odsunięta o 1 cm od skóry.



Rys. 9.3.6. Ułożenie anten [35]: a) układ płaski, b) układ cylindryczny

W każdej pozycji antena dipolowa jest wzbudzana impulsem w postaci [36]:

$$V(t) = V_0 (t - t_0) e^{-\frac{(t-t_0)^2}{\tau}} \quad (9.3.19)$$

gdzie:

$V_0$  – wartość  $V_0$  jest wykorzystywana do dostosowania amplitudy impulsu.

W trakcie wzbudzenia oraz po nim rejestrowany jest prąd (układ płaski) lub napięcie (układ cylindryczny). Początkowa odpowiedź zdominowana jest przez impuls pochodzący od odbicia od skóry. Późniejsza odpowiedź pochodzi od rozproszenia wstecznego od nowotworu oraz zakłóceń biernych. Sygnał jest przetwarzany w celu redukcji początkowej zawartości, która ma o wiele większą amplitudę, niż reakcja nowotworu oraz w celu selektywnego wzmocnienia reakcji nowotworu przy jednoczesnej redukcji zakłóceń biernych, umożliwiającą wiarygodną lokalizację nowotworów na zrekonstruowanych obrazach [22]. Powstałe sygnały przechodzą proces kalibracji, całkowania i kompensacji, co jest opisane w [22].

### 9.3.6. Algorytm ogniskujący

W celu utworzenia obrazu przetworzone sygnały są syntetycznie ogniskowane na określonym punkcie w piersi. Początkowo obliczone są odległości od każdej z anten do punktu skupienia. Następnie są one konwertowane na przesunięcie czasowe. Przesunięcia te są stosowane w celu zidentyfikowania udziału z każdego przetworzonego sygnału. Wszystkie udziały są sumowane, ich wartości podnoszone są do kwadratu i przypisywane wartościom piksela w punkcie skupienia. Wartość intensywności piksela ( $I$ ) w miejscu ( $\mathbf{r}$ ) jest opisana wzorem:

$$I(\mathbf{r}) = \left[ \sum_{m=1}^M B_m(\tau_m(\mathbf{r})) \right]^2 \quad (9.3.20)$$

gdzie:

$$\tau_m(\mathbf{r}) = 2|\mathbf{r} - \mathbf{r}_m|/v \quad (9.3.21)$$

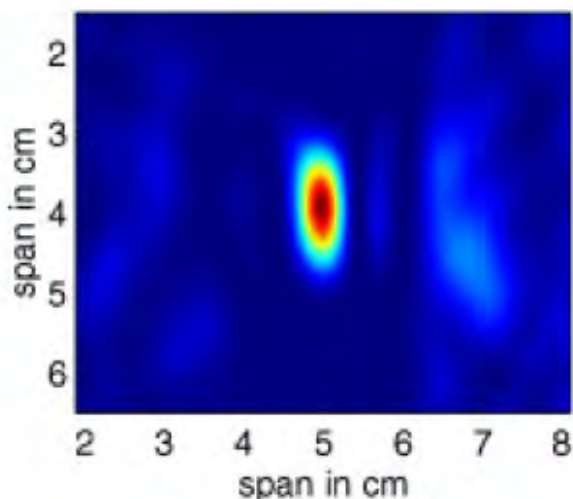
$v$  – prędkość rozchodzenia się sygnału,

$\mathbf{r}_m$  – położenie anteny w  $m$ -tym punkcie,

$B_m$  – maksymalna wartość sygnału rozproszonego.

Przykładowy obraz uzyskany za pomocą algorytmu przedstawia rysunek 9.3.7.

Punkt skupienia jest skanowany w nowym miejscu modelu i cały proces jest powtarzany. W obydwu układach współrzędne punktu skupienia są określone w odniesieniu do lokalizacji skóry.



Rys. 9.3.7. Obraz otrzymany po rekonstrukcji w 3D dla układu płaskiego po przecięciu osią Z [22]

### 9.3.7. Wnioski

Niniejszy artykuł ma charakter wprowadzenia w tematykę tomografii mikrofalowej. Omówiono w nim podstawy algorytmu FDTD, jak i konstrukcji obrazu w zakresie mikrofalowym.

Wyniki obliczone po kalibracji przedstawiają redukcję wczesnej odpowiedzi (impulsu). Kompensacja znacznie poprawia względną odpowiedź nowotworu, jednakże trudno jest go rozpoznać i zlokalizować za pomocą pojedynczego sygnału. Sztuczne ogniskowanie odbić z wielu anten pozwala na ograniczenie zakłóceń oraz poprawę odpowiedzi nowotworu, co jest niezbędne do sprawnego wykrywania zaburzeń.

W zapobieganiu zachorowaniu na raka piersi oraz umieralności najważniejsza jest diagnostyka i wczesne rozpoznawanie chorób. Dlatego zastosowanie tomografii mikrofalowej jako metody wspomagającej wymienione metody diagnostyki w medycynie jest uzasadnione.

## 9.4. Podsumowanie

Modelowanie zjawisk elektromagnetycznych stanowi centrum badań w obszarze zastosowań elektromagnetyzmu. Obliczenia elektromagnetyczne maszyn i urządzeń elektrycznych odgrywają zasadniczą rolę w ich projektowaniu i eksploatacji. W ostatnich kilkudziesięciu latach nastąpił gwałtowny postęp w dziedzinie metod numerycznych i rozwoju nowych programów komputerowych, pozwalających na opracowanie wielu modeli matematycznych uwzględniających nieliniowy charakter zjawisk we wspomnianych urządzeniach. Jednak w badaniach inżynierskich, równie ważną rolę odgrywają modele fizyczne. Dopiero



odpowiednia aparatura i układy pomiarowe pozwalają na otrzymanie wyników weryfikujących obliczenia matematyczne. Właśnie w tym celu stworzono ciągle doskonalone i doposażane w aparaturę Laboratorium Pomiarów Magnetycznych.

Ostatnio zarysowuje się w Polsce specjalizacja, polegająca na wykorzystaniu pole elektromagnetycznego w medycynie. W szczególności prowadzi się badania dotyczące rozprzestrzeniania się fal elektromagnetycznych w organizmach żywych m.in. w diagnostyce medycznej. Pracownicy Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii również w nich uczestniczą prowadząc wstępne badania z zastosowaniem tomografii mikrofalowej, diagnozującej obecność nowotworu w gruczole piersiowym. Trwają też przygotowania do zajęć dydaktycznych w ramach przedmiotu Kompatybilność Bioelektromagnetyczna realizowanego w przyszłym roku międzyuczelnianego (Politechnika Lubelska oraz Uniwersytet Medyczny w Lublinie) kierunku studiów „Inżynieria Biomedyczna”.

## 9.5. Literatura

- [1] Alessandro L., Ferrero A. A method for the determination of the parameters of the hysteresis model of magnetic materials. I IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Volume 43, Issue 4, 1994.
- [2] Azzerboni B., Carpentieri M., Finocchio G., Super-Lorentzian Preisach Function and its applicability to models of scalar hysteresis. Physica B 343 (2004).
- [3] Baranowski J., H. Zmodyfikowane ujęcie modelu Jilesa-Athertona. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994.
- [4] Fiorillo F. Measurement and characterisation of magnetic materials. Elsevier Science BV 2004.
- [5] Giżewski T. Modelowanie obwodów magnetycznych przy zastosowaniu algorytmów sztucznych sieci neuronowych. Rozprawa doktorska Lublin 2009.
- [6] Giżewski T., Wac-Włodarczyk A. Determination Values of Static Hysteresis of the Preisach Model by Experimental Results. 4th International Conference: Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection - ELMECO-4, Nałęczów 2003,
- [7] Giżewski T., Wac-Włodarczyk A., Czerwiński D. Identification of Magnetic Material Presented by Artificial Neural Network Algorithm. 4th International Conference: Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection - ELMECO-4, Nałęczów, Poland 2003,
- [8] Giżewski T., Wac-Włodarczyk A., Czerwiński D., Komarzyniec G. The Applying of Algorithms of Artificial Neural Network to Analysis and the Processing of Measured Data in Tasks of Classification of Ferromagnetic Objects. 5th European Magnetic Sensors and Actuators Conference, Cardiff, United Kingdom 2004.
- [9] Giżewski T., Wac-Włodarczyk A., Czerwiński D., Wolszczak P. Grouping Process of Magnetic Materials in Similarity Classes on the Base of Dynamic

- Magnetic Permeability Measurements. 5th European Magnetic Sensors and Actuators Conference, Cardiff, United Kingdom, July 4 – 7, 2004.
- [10] Giżewski T., Wac-Włodarczyk A., Czerwiński D., Wolszczak P. Identification of Magnetic Material with Kohonen Artificial Neural Network. Soft Magnetic Materials 16, Dusseldorf, Germany.
  - [11] Jiles D. C. Introduction to magnetism and magnetic materials. Chapman & Hall 1998.
  - [12] Jiles D. C., Atherton D. L. Theory of Ferromagnetic Hysteresis, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 61 (1986).
  - [13] Karandiejew K. B. . Pomiar elektryczny metodami mostkowymi i kompensacyjnymi, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1969.
  - [14] Kis P., Iványi A. Parameter identification of Jiles-Atherton model with nonlinear least-square method, Physica B, Vol. 343, 2004.
  - [15] Kukielka L. Podstawy badań inżynierskich, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
  - [16] Łęski J. Systemy neuronowo-rozmyte. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
  - [17] Osowski S. Systemy neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
  - [18] Osowski S. Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
  - [19] Stąpor K. Automatyczna klasyfikacja obiektów. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2005.
  - [20] Wac-Włodarczyk A., Goleman R., Czerwiński D., Giżewski T. Symulacja pracy mostkowego układu porównawczego materiałów ferromagnetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 12/2006.
  - [21] Berenger J. P. : A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves. Journal of Computational Physics 114, str. 185-200, 1994.
  - [22] Fear E. C., Li X., Hagness S. C., Stuchly M. A. : Confocal microwave imaging for breast cancer detection: Localization of tumors in three dimensions. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 49, nr. 8, sierpień 2002.
  - [23] Fear E.C., Meaney P.H., Stuchly M.A. "Microwave for Breast Cancer Detection", IEEE Potentials, 22(1): pp.12-18, Feb/Mar 2003.
  - [24] Fear E.C., Hagness S.H., Meaney P.H., Okoniewski M. and Stuchly M.A., "Enhancing breast tumor detection with near-field imaging", IEEE Microwave Magazine, March 2002.
  - [25] Gabriel S., Lau R. W., Gabriel C. : The dielectric properties of biological tissues: III Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys. Med. Biol, vol. 41, str. 2271-2293, 1996.
  - [26] <http://epid.coi.waw.pl>.
  - [27] Kerner T. E., Paulseb K. D., Hartov A., Soho S. K., Poplack S. P.: Electrical Spectroscopy of the Breast: Clinical Imaging Results in 26 Subjects. IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 21, nr. 6, str. 638-645, czerwiec 2002.

- [28] Li X., Hagness S. C.: A confocal microwave imaging algorithm for breast cancer detection. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 11, nr. 3, marzec 2001.
- [29] Malich A., Fritsch T., Anderson R., Boehm T., Freesmeyer M. G., Fleck M., Kaiser W. A.: Electrical impedance scanning for classifying suspicious breast lesions: first result. European Radiology 10, str. 1555-1561, Springer-Verlag 2000.
- [30] Miaskowski A., Krawczyk A., Wac-Włodarczyk A.: Zastosowanie promieniowania mikrofalowego w detekcji raka gruczołu piersiowego. CIOP-PIB, Warszawa 2007.
- [31] Pawlicki G., Pałko T., Gołnik N., Gwiazdowska B., Królicki L.: Fizyka medyczna. Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, T. 9, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, 2000.
- [32] Sullivan D. M.: Electromagnetic Simulation Using The FDTD Method. IEEE Press Series on RF and Microwave Technology, 2000.
- [33] Szpakowska M., Sibilska-Wierchosławska E., Kocur J.: Przydatność tomografii rezonansu magnetycznego w wykrywaniu raka piersi u nosicierek mutacji w genie BRCA 1. Pol. Przegl. Radiol., 72 (Sup 1), str. 125-126, 2007.
- [34] Taflov A., Hagness S. C.: Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Artech House, Incorporated, czerwiec 2005
- [35] [www.roik.pl](http://www.roik.pl) – dane z najnowszego raportu Krajowej Bazy Danych Nowotworowych opracowanego na podstawie danych Zakładu Epidemiologii i Prewencji Nowotworów Centrum Onkologii Instytutu im. Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie.
- [36] Yee K. S.: Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. IEEE Trans. Antennas Propag. 14, 302, 1966.
- [37] Zastrow E., Davis S. K., Lazebnik M., Kelcz F., Van Veen B. D., Hagness S. C.: Development of an anatomically realistic numerical breast phantoms with accurate dielectric properties for modeling microwave interactions with the human breast. IEEE Trans Bio-med Eng, vol. 55, nr. 12, str. 2792-2800, grudzień 2008.
- [38] Zhao M., Shea J. D., Hagness S. C., van der Weide D. W., Van Veen B. D., Varghese T.: Numerical study of microwave scattering in breast tissue via coupled dielectric and elastic contrasts. IEEE Antenn Wirel PR, vol. 7, str. 247-250, 2008.

## 10. WYBRANE ZAGADNIENIA ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

### 10.1. Wstęp

Ostatnie dwa stulecia niespotykanego wcześniej intensywnego rozwoju techniki i nieustannego wzrostu liczby ludności przyczyniły się do głębokich zmian środowiska naturalnego człowieka i znacznej jego degradacji. Zmiany te dotyczą w równym stopniu powietrza, wody i gleb i są efektem dynamicznego rozwoju gospodarki, w tym szczególnie energetyki i przemysłu chemicznego, których oddziaływanie objęło całą Ziemię. Zmiany klimatu ziemskiego były przez stulecia czymś naturalnym, jednak ludzka aktywność w ostatnich dwu stuleciach jest powodem „globalnego ocieplenia”. W wyniku uwalniania się znacznych ilości tzw. gazów cieplarnianych następują istotne zmiany absorpcji i emisji promieniowania słonecznego w atmosferze ziemskiej. Ubytki w warstwie ozonowej, która chroni Ziemię przed niebezpiecznym promieniowaniem ultrafioletowym, obserwuje się od ponad 25 lat. Są one wynikiem działalności przemysłowej (chłodnictwo, produkcja aerozoli i rozpuszczalników), chemizacji rolnictwa i spalania biomasy.

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

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

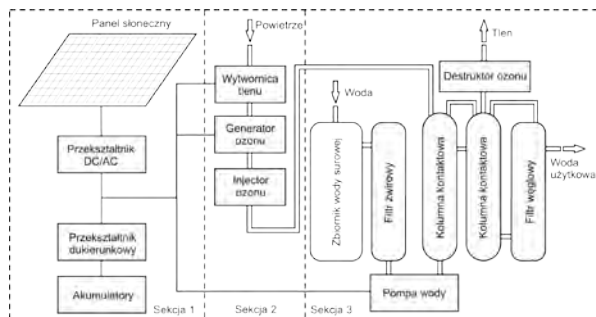
Zanieczyszczenie środowiska naturalnego może spowodować, że w przyszłości w celu zaspokojenia potrzeb na wodę użytkową koniecznym stanie się uzdatnianie wód o bardzo złej jakości. Z kolei wzrastające ograniczenia emisji zanieczyszczeń do środowiska naturalnego w istotny sposób ograniczyć mogą stosowanie chemicznych środków dezynfekujących wodę pitną. Pogłębiające się problemy energetyczne narzucać będą coraz większe ograniczenia dla poboru energii elektrycznej przez instalacje oczyszczania i wzbogacania wody.

Rozwiązaniem tych problemów mogą być małe instalacje ozonowania wody zasilane w energię elektryczną ze źródeł odnawialnych. Stosowanie ozonu w procesie uzdatniania wody oraz zastosowanie ozonu w procesach dezynfekcji

układu technologicznego eliminuje konieczność stosowania dodatkowych środków dezynfekcyjnych.

## 10.2. Instalacja ozonowania wody zasilana z ogniw fotowoltaicznych

Na rysunku 10.1 przedstawiono budowę małej przydomowej instalacji ozonowania wody, która składa się z trzech zasadniczych części: układu dostarczania energii elektrycznej z panelami fotowoltaicznymi, akumulatorami i przekształtnikami DC/AC; sekcji wytwarzania tlenu i ozonu oraz układu wodnego ze zbiornikami kontaktowymi, filtrami i pompami wody.



Rys. 10.1. System ozonowania wody.

Jest to system całkowicie niezależny, przeznaczony do pracy ciągłej w trudnych warunkach klimatycznych. Opracowane rozwiązania technologiczne jest doskonałym do wykorzystania, na oddalonych od sieci elektroenergetycznej terenach lub w miejscach, w których sieć elektroenergetyczna jest niestabilna i zawodna.

### 10.2.1. System fotowoltaiczny

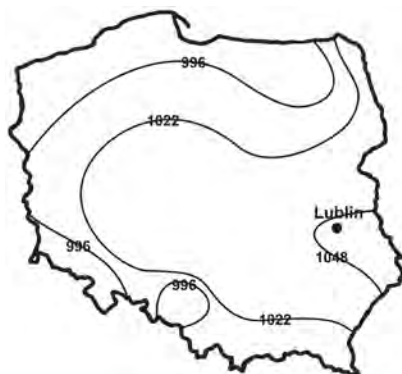
Ilość energii słonecznej docierającej do danego miejsca zależy od szerokości geograficznej oraz od czynników pogodowych. Średnie roczne nasłonecznienie obszaru Polski wynosi  $\sim 1100 \text{ kWh/m}^2$  ( $\sim 3500 \text{ MJ/m}^2$ ) na rok na poziomą powierzchnię, co odpowiada wartości opałowej 120 kg paliwa umownego (węgiel kamienny 29300 kJ/kg, ropa naftowa 41860 kJ/kg). Mapy nasłonecznienia obszaru polski pokazują rysunki 10.2 i 10.3.

Nasłonecznienia dla obszaru Polski charakteryzuje się bardzo dużym zróżnicowaniem w ciągu roku, co widać na rysunku 10.4. I tak, Lublina suma roczna wynosi 1107 kWh i w sierpniu dociera do powierzchni ziemi ponad 15% rocznej energii, natomiast w grudniu jest to zaledwie 1,6% rocznej sumy napromieniowania.

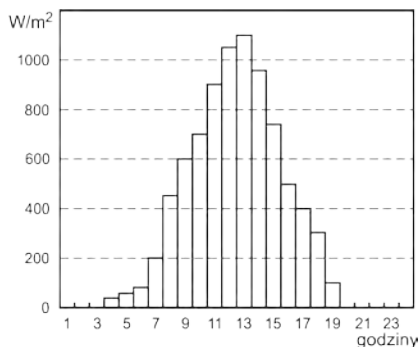
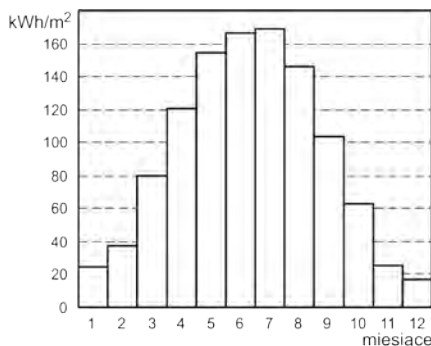
Obecnie całkowity koszt wytworzenia energii elektrycznej przy użyciu fotoogniw jest o rząd wielkości wyższy, niż w przypadku energii jądrowej. Mimo to, stosowanie fotoogniw staje się opłacalne, o ile zapotrzebowanie na moc elektryczną jest niewielkie. Prawidłowo dobrana instalacja powinna pokrywać ok. 95-100% zapotrzebowania na energię elektryczną w okresie letnim.



Rys. 10.2. Usłonecznienie na terenie Polski



Rys. 10.3. Nasłonecznienie na terenie Polski (KWh/m<sup>2</sup>)



Rys. 10. 4. Nasłonecznienie terenu polski: a) dla poszczególnych miesięcy, b) dobowe

W tablicy 10.1 zestawiono parametry ogniw fotowoltaicznych użytych do zasilania systemu ozonowania wody.

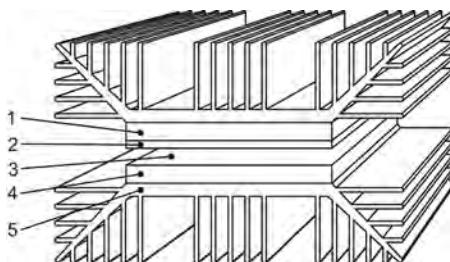
Table 10.1. Parametry ogniw fotowoltaicznych

| Moc maksymalna | Napięcie maksymalne | Prąd maksymalny |
|----------------|---------------------|-----------------|
| 210 W          | 26,6 V              | 7,9 A           |

### 10.2.2. Wytwarzanie ozonu

Generacja ozonu odbywa się z wykorzystaniem wyładowań koronowych. Ozonator zasilono z zasilacza wysokiej częstotliwości ze sterowaniem impulsowym i modulacją amplitudy. Zmieniając nastawy zasilacza można płynnie regulować koncentrację ozonu. Podstawową częścią ozonatora są elektrody tytanowe umieszczone w niewielkiej odległości od siebie. Jedna z elektrod posiada na swej powierzchni warstwę dielektryka zabezpieczającą równomierność wyładowań oraz

zapobiega wyładowaniom iskrowym lub łukowym. Dla obniżenia poboru energii elektrycznej przez ozonator zastosowano w nim rozbudowany system radiatorów umożliwiający wydajne chłodzenie elektrod powietrzem atmosferycznym (rys.10. 5).

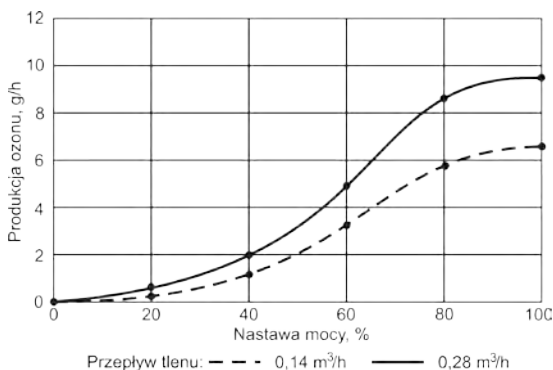


Rys. 10.5. Budowa ozonatora: 1, 4 – elektrody, 2 – dielektryk, 3 – przestrzeń wyładowcza, 4 – radiator

Tabela 10.2. Parametry ozonatora

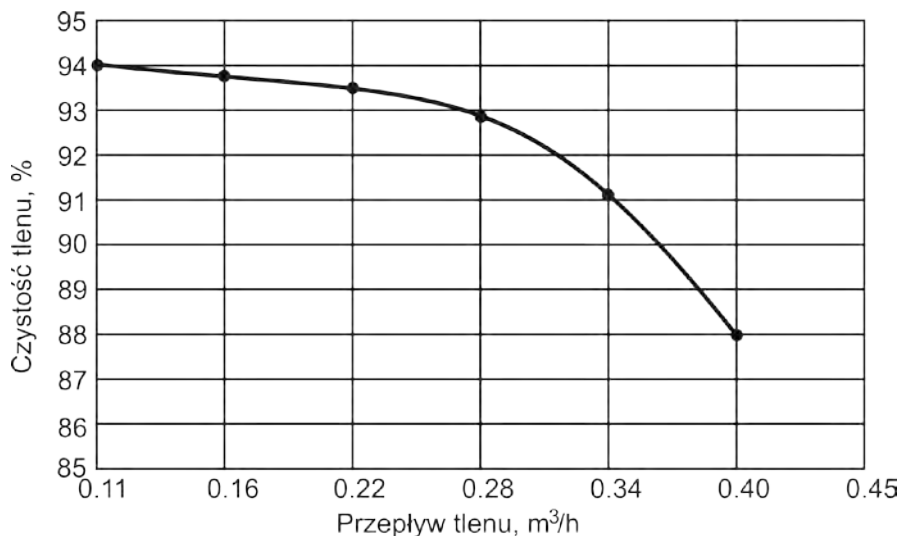
| Maksymalna produkcja ozonu | Maksymalna koncentracja ozonu | Przepływ gazu | Pobór mocy |
|----------------------------|-------------------------------|---------------|------------|
| g/h                        | %                             | l/m           | W          |
| 6                          | 4%                            | 3,3÷4,7       | 180        |

Zastosowany generator ozonu może pracować zarówno z czystym tlenem jak i z powietrzem atmosferycznym. W przypadku gdy wykorzystuje się powietrze atmosferyczne wydajność wynosi 1,5 grama ozonu na godzinę, przy zasilaniu czystym tlenem wydajność wzrasta do 6 g/h. Wykres wydajności ozonatora dla różnych przepływów i nastaw mocy przedstawiono na rysunku 10.6. Nieprzerwany dopływ tlenu do ozonatora zapewnia wytwornica tlenu. Jeśli wydajność 1,5 grama ozonu na godzinę jest wystarczająca, wówczas wytwornicę tlenu można wyłączyć z pracy, a tym samym zmniejszyć pobór energii elektrycznej.



Rys. 10.6. Wykres wydajności produkcji ozonu.

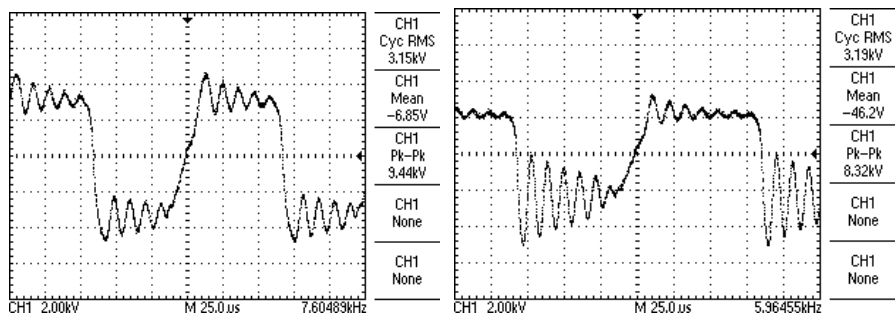
W wytwornicy następuje rozdział składników powietrza poprzez absorpcję azotu w syntetycznych sitach molekularnych. Sita te wypełniają dwa zbiorniki absorpcyjne, które naprzemiennie napełniane są sprężonym powietrzem o ciśnieniu 11 barów. Przechodzący przez sita tlen o czystości 93% gromadzony jest w dodatkowym zbiorniku. Nasycone azotem sita molekularne regenerują się samoczynnie poprzez cykliczne rozprężanie do ciśnienia atmosferycznego i przepływ w przeciwną stronę. Rozwiązanie to zapewnia praktycznie nieograniczoną trwałość wytwornicy tlenu a cena produkowanego tlenu jest uzależniona jedynie od ceny energii elektrycznej. Dobierając tempo przepływu gazu przez wytwornicę należy brać pod uwagę zmniejszającą się czystość tlenu (rys. 10. 7). W omawianym rozwiązaniu wydajność produkcji tlenu wynosi  $0,35 \text{ m}^3/\text{h}$  przy przepływie tlenu przez generator ozonu na poziomie  $0,28 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Rys. 10.7. Zależność czystości wytwarzanego tlenu od prędkości przepływu.

Ważnym zagadnieniem jest zasilanie elektryczne i związany z tym problem współpracy ozonatora ze źródłem napięcia. Spowodowane jest to pojemnościowym charakterem ozonatora oraz nieliniowością zjawisk jakie w nim zachodzą. Dlatego proces syntezy ozonu jest energochłonny, a wydajność produkcji ozonu zależy od wartości i częstotliwości napięcia zasilającego. Zakres zmian napięcia jest ograniczony z jednej strony napięciem zapłonu wyładowania w ozonatorze a z drugiej wytrzymałością na przebicie warstwy dielektrycznej. Stąd też wydajności ozonu korzystniej jest regulować przez zmianę częstotliwości niż przez zmianę napięcia zasilającego. Na rysunku 10.8 przedstawiono przebiegi napięcia na elektrodach ozonatora dla różnych częstotliwości. Zwiększając częstotliwość uzyskuje się nie tylko zwiększenie wydajności ale również obniżenie napięcia zasilającego ozonator oraz obniżenie zużycia energii elektrycznej.





Rys. 10.8. Napięcie międzyelektrode pracującego ozonatora.

### 10.2.3. System ozonowania wody

W procesie ozonowania wody zasadniczy wpływ na jego stabilność oraz końcową jakość ma odpowiednio wykonany zbiornik kontaktowy. W większości systemów ozonowania ozon dostarczany jest do wody w postaci pęcherzyków poprzez dyfuzory. Efektywność takiego procesu jest niska z dwóch powodów: (1) ozon nie jest równomiernie mieszany z wodą, (2) ozon w dużych ilościach ulatuje z wody do destruktorów ozonu skąd niewykorzystany tlen jest wydmuchiwany do atmosfery. W momencie, kiedy mamy zużytkowaną energię na wyprodukowanie ozonu, należałoby się zastanowić, jak wykorzystać gotowy produkt zamiast stracić dodatkową energię na jego destrukcję. W instalacji zastosowano system dwóch kolumn kontaktowych firmy WOFIL (rys. 10.9).

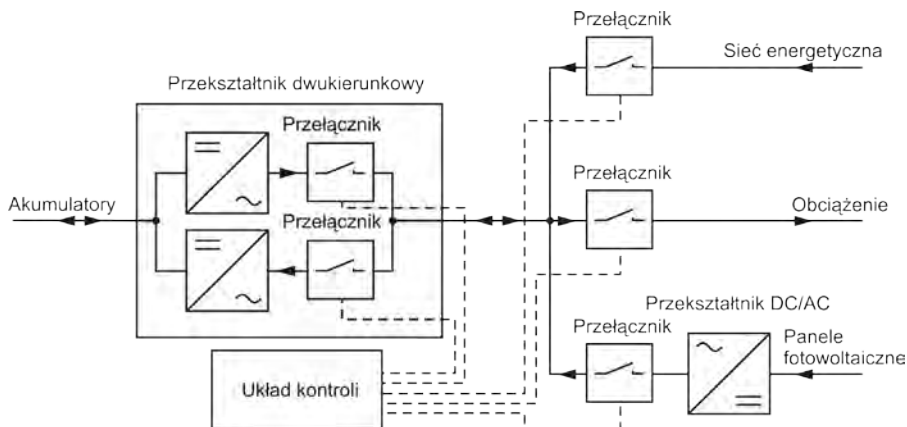


Rys. 10.9. Kolumny kontaktowe

W rozwiązaniu tym woda surowa jest wstępnie napowietrzana i utleniana powietrzem zmieszany z ozonem ulatującym z komory kontaktowej. Rozwiązanie to umożliwiło zwiększenie wydajności procesu ozonowania o blisko 30% (w porównaniu do rozwiązań konkurencyjnych) bez wzrostu poboru energii elektrycznej. W efekcie uzyskano też zmniejszenie ilości gazu wydychanego do destruktorów ozonu oraz mniejsze wartości ozonu resztkowego po zbiorniku kontaktowym. W większości instalacji ozonowania wody występuje problem zabarwiania wody na skutek reakcji chemicznych zachodzących między ozonem a rudami metali zawartymi w wodzie. Zastosowane kolumny kontaktowe firmy WOFIL wraz z systemem filtrów cząstek stałych eliminują ten problem całkowicie. Na wyjściu z systemu uzyskuje się odkażoną i wyklarowaną wodę o śladowej ilości ozonu resztkowego. Do usuwania nadmiernej ilości produkowanego ozonu i usunięcia ozonu resztkowego zastosowano destruktory katalityczne. Zrezygnowano ze stosowania węgla aktywnego gdyż ulega on zużyciu, pod wpływem wilgoci zbija się a po rozgrzaniu może ulegać samozapłonowi. Zastosowana w destruktorze masa katalityczna pozbawiona jest wad węgla aktywnego a przy kontakcie z ozonem samoczynnie rozgrzewa się do temperatury przy której następuje swobodne odparowanie wody. Uzyskany po destruktorach odfiltrowany tlen ponownie trafia do systemu generacji ozonu.

#### 10.2.4. Zasilanie w energię elektryczną

Na rysunku 10.10 przedstawiono schemat blokowy sieci elektrycznej współpracującej z systemem ozonowania wody.



Rys.10Z.10. Sieć energetyczna zasilająca system ozonowania wody

Podstawowym elementem obwodów elektrycznych jest dwukierunkowy przekształtnik. Zarządza on obciążeniami, przepływem energii oraz pracą akumulatorów. Stanowi wygodne połączenie urządzeń AC i DC w jeden system energetyczny. Inwerter tworzy sieć napięcia stałego 24V oraz typową sieć napięcia zmiennego 110 V 60 Hz lub 230 V 50 Hz. W sieciach tych integrowane są wszystkie urządzenia od generatorów elektrycznych po odbiorniki energii. Systemy

fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe, generatory z silnikiem diesla, elektrownie wodne są połączone wraz z obciążeniem po stronie napięcia przemiennego. Natomiast baterie akumulatorów, ogniwa paliwowe i odbiorniki DC integrowane są po stronie napięcia stałego. Parametry przekształtnika przedstawia tabela 10.3.

Tabela 10. 3. Parametry przekształtnika dwukierunkowego

| Parametry wejściowe       |                |
|---------------------------|----------------|
| Napięcie wejściowe        | 173 ÷ 250 V    |
| Częstotliwość             | 40 ÷ 60 Hz     |
| Prąd wejściowy            | 2 ÷ 56 A       |
| Parametry wyjściowe       |                |
| Napięcie AC               | 202 ÷ 253 V    |
| Częstotliwość             | 50 Hz          |
| Moc ciągła                | 5000 W         |
| Moc dla pracy 5 / 1 min   | 7200 / 8400 W  |
| Prąd wyjściowy            | 21 A           |
| Maksymalny prąd wyjścia   | 100 A (100 ms) |
| Sprawność                 | 95 %           |
| Parametry akumulatorów    |                |
| Napięcie                  | 41 ÷ 63 V      |
| Maksymalny prąd ładowania | 120 A          |
| Ciągły prąd ładowania     | 100 A          |
| Pojemność akumulatorów    | 100 ÷ 10000 Ah |

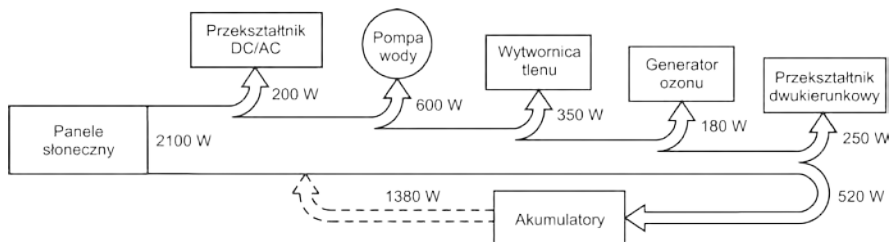
Włączenie ogniw fotowoltaicznych po stronie napięcia przemiennego wymusza zastosowanie dodatkowego przekształtnika DC/AC. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość instalowania ogniw fotowoltaicznych w dowolny oddaleniu od całego systemu ozonowania. Zastosowanie przekształtnika DC/AC eliminuje konieczność stosowania drogiego okablowania DC i daje wysoki stopień dopasowania. Parametry przekształtnika DC/AC podaje tabela 10.4.

Tabela 10.4. Parametry przekształtnika DC/AC

| Parametry wejściowe (DC) |             |
|--------------------------|-------------|
| Maksymalne napięcie      | 600 V       |
| Prąd maksymalny          | 11 A        |
| Parametry wyjściowe (AC) |             |
| Napięcie                 | 180 – 260 V |
| Prąd maksymalny          | 11 A        |
| Moc wyjściowa            | 2100 W      |
| Sprawność                | 96%         |

### 10.2.5. Rozpływ energii

Podstawowym problemem przy projektowaniu systemu jest ograniczona wartość mocy jaką można uzyskać z ogniw fotowoltaicznych. Na rysunku 11 przedstawiono graf poboru mocy przez poszczególne elementy elektryczne systemu ozonowania.



Rys.10.11. Pobór energii elektrycznej w systemie.

Przy prawidłowym zestrojeniu całego układu można zrezygnować ze stosowanych w instalacji pilotowej elementów elektronicznych odpowiedzialnych za kontrolę pracy systemu. Tym sposobem zmniejszyć można pobór mocy o kilkaset watów.

Zaprezentowany system ozonowania wody znajduje się obecnie na etapie przygotowania do prac wdrożeniowych. Jako system w pełni autonomiczny o konstrukcji modułowej może być łatwo dopasowywany do indywidualnych potrzeb. Może on stanowić wyposażenie zarówno domów jednorodzinnych jak również znaleźć zastosowanie do oczyszczania wody w krajach nisko rozwiniętych.

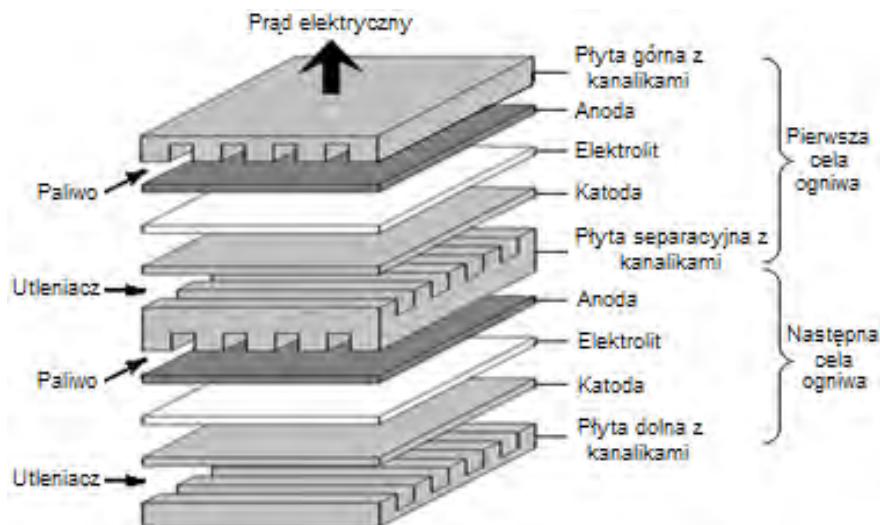
### 10.3. Ogrzewanie budynków układami zintegrowanymi z ogniwami paliwowymi

Na świecie występuje duże uzależnienie różnych gałęzi gospodarki od energii. Niestety zasoby surowców naturalnych nieustannie maleją, a większość obecnych technologii ich pozyskiwania i przetwarzania ma negatywny wpływ na stan środowiska naturalnego. W związku z tym uzasadnione jest dążenie do zastąpienia ich źródłami ekologicznymi, których wykorzystanie nie wpłynie negatywnie na środowisko, zredukuje ilość odpadów oraz pozwoli zaoszczędzić zasoby surowców naturalnych. Jednym z rozwiązań spełniającym te wymagania są systemy wykorzystujące ogniwa paliwowe zasilane wodorem (pierwsze ogniwo zostało zbudowane już w 1839 roku).

W układach grzewczych małej mocy stosuje się generatory CHP (z ang. Combined Heat and Power – generator energii elektrycznej i ciepłej) z ogniwami typu PEMFC (z ang. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) i ogniwami typu SOFC (z ang. Solid Oxide Fuel Cell). Natomiast w układach grzewczych o większych mocach (1+5 MW) stosuje się układy hybrydowe (głównie z ogniwami typu SOFC).

### 10.3.1. Budowa i zasada działania ogniwa paliwowego

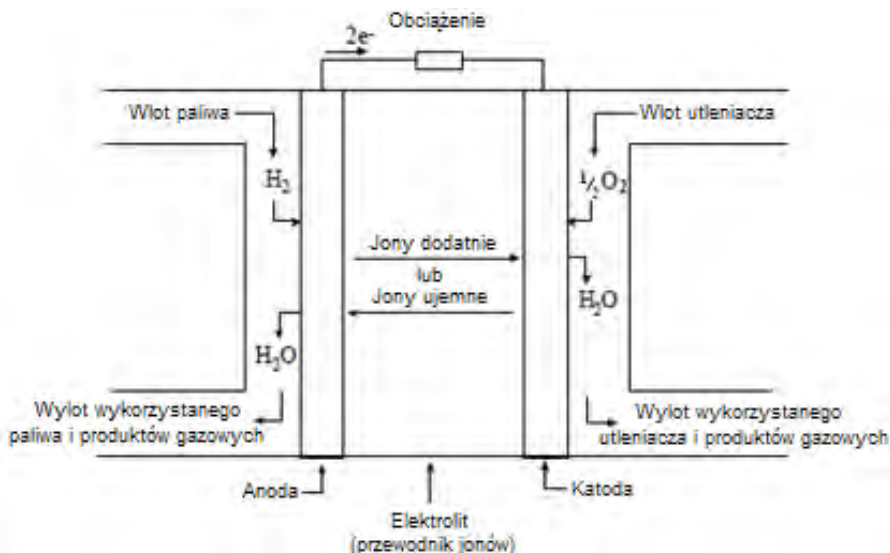
Ogniwo paliwowe zostało zbudowane już w roku 1839 przez brytyjskiego uczonego Williama Grove'a. Jednak dopiero od kilkunastu lat można zauważyć szybszy rozwój tej technologii, głównie dzięki zastosowaniu nowoczesnej techniki produkcji oraz wykorzystaniu nowych materiałów [9]. Stos ogniw paliwowych składa się z pojedynczych elementów (cel), z których każdy zawiera anodę, katodę i matrycę elektrolitową. Elementy są przedzielone płytami bipolarnymi, wyposażonymi w kanały dopływu reagentów (paliwa i utleniacza) [16]. Na rysunku 10.3.1 przedstawiono budowę ogniwa paliwowego.



Rys. 10.3.1. Budowa ogniwa paliwowego [16]

W ogniwie paliwowym następuje bezpośrednia przemiana energii chemicznej w energię elektryczną. Jest to urządzenie, w którym paliwo (wodór) jest doprowadzane w sposób ciągły do anody, a utleniacz (tlen) w stanie czystym lub mieszaninie jest podawany w sposób ciągły do katody. Procesom elektrochemicznym towarzyszy przepływ elektronów od anody do katody. Zamknięcie obwodu odbywa się dzięki jonom, które przemieszczają się w elektrolicie. W wyniku elektrochemicznej reakcji wodoru i tlenu powstaje prąd elektryczny, woda i ciepło [10]. Zasadę działania ogniwa paliwowego przedstawiono na rysunku 10.3.2.

Siła elektromotoryczna pojedynczego ogniwa wynosi około 1 V, a natężenie prądu elektrycznego w obwodzie zależy od powierzchni elektrod. Napięcie można zwiększać łącząc ze sobą szeregowo wiele takich ogniw, zwiększając w ten sposób ich wydajność [1].



Rys. 10. 3.2. Zasada działania ogniwa paliwowego [10]

Tlen jest pobierany zwykle z powietrza atmosferycznego, natomiast wodór jest dostarczany w postaci czystej lub jest wytwarzany w urządzeniu zwanym reformerem, w którym gaz powstaje w procesie rozkładu paliwa pierwotnego. Paliwem tym może być gaz ziemny, destylaty ropy naftowej, płynny propan, zgazyfikowany węgiel oraz paliwa odnawialne, takie jak etanol, metanol. Można stosować również gazy wydzielające się ze składowisk odpadów organicznych lub z oczyszczalni ścieków. W procesie wytwarzania wodoru w reformerze są emitowane zanieczyszczenia w ilości znikomej w porównaniu z ilościami emitowanymi np. podczas procesów spalania paliw pierwotnych w ciepłych układach energetycznych [11].

### 10.3.2. Klasyfikacja i parametry ogniw paliwowych

Opracowano już wiele typów ogniw paliwowych, a klasyfikuje się je poprzez określenie rodzaju elektrolitu [9]:

- 1). **AFC** – Alkaline Fuel Cell (alkaliczne ogniwa paliwowe).
- 2). **PEMFC** – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (ogniwa paliwowe z polimerową membraną wymiany jonów).
- 3). **PAFC** – Phosphoric Acid Fuel Cell (ogniwa paliwowe z kwasem fosforowym).
- 4). **MCFC** – Molten Carbonate Fuel Cell (ogniwa paliwowe ze stopionym węglanem).
- 5). **SOFC** – Solid Oxide Fuel Cell (ogniwa paliwowe ze stałym tlenkiem).

Parametry wymienionych ogniw paliwowych przedstawiono w tablicy 10.2.1.

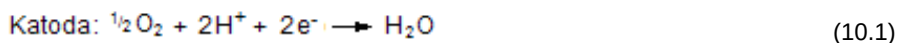
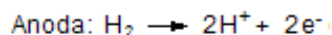
Tabela 10.3.1. Parametry ogniw paliwowych [9, 16]

| Ogniwo paliwowe | Elektrolit                                                | Elektrody                             | Paliwo                              | Temp. pracy i zastosowanie                              | Sprawność [%] |
|-----------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------|
| AFC             | Roztwór wodorotlenku potasu                               | Różne metale                          | Wodór, metan (bez CO <sub>2</sub> ) | 100-200°C<br>Technika wojsk. i kosmiczna                | 40-50         |
| PEMFC           | Jonowymienna membrana z polimeru                          | Platyna                               | Wodór, metanol (bez CO)             | Do 120°C<br>Transport, cele grzewcze                    | 40-50         |
| PAFC            | Kwas fosforowy                                            | Platyna naniesiona na podłoże węglowe | Wodór, gaz ziemny, nafta, (bez CO)  | 150-200°C<br>Źródło energii elektr. i cieplnej          | 40-50         |
| MCFC            | Mieszanina węglanów alkalicznych                          | A-porowaty nikiel K-tlenek niklu      | Gaz ziemny, metanol, biogaz         | 600-700°C<br>Cele grzewcze                              | Ponad 60      |
| SOFC            | Stały tlenek metalu, najczęściej cyrkonu ZrO <sub>2</sub> | A-porowaty nikiel K-magnez            | Gaz ziemny, biogaz                  | 900-1000°C<br>Cele grzewcze, źr. zas. pom. w energetyce | Ponad 60      |

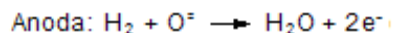
### 10.3.3. Wpływ zastosowania ogniw paliwowych na środowisko naturalne

Analizując reakcje chemiczne zachodzące w ogniwach typu PEMFC i SOFC – równania (10.1) i (10.2) – można stwierdzić, że przy zasilaniu ogniwa czystym wodorem i czystym tlenem nie wydziela ono żadnych szkodliwych substancji [9].

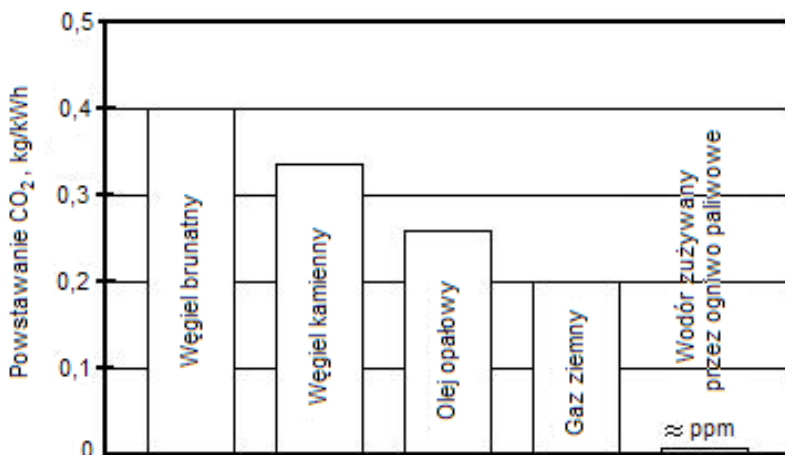
Reakcje zachodzące w ogniwie typu PEMFC:



Reakcje zachodzące w ogniwie typu SOFC:



Jednak w warunkach rzeczywistych w wyniku zanieczyszczenia wodoru i powietrza mogą wydzielać się minimalne ilości CO<sub>2</sub> oraz innych substancji. Na rysunku 10.3.3. przedstawiono wielkość emisji CO<sub>2</sub> dla różnych nośników energii, z którego wynika, że źródłem śladowych, rzędu ppm, emisji CO<sub>2</sub> jest wodór wykorzystywany w ogniwie paliwowym.



Rys. 10.3.3. Emisja CO<sub>2</sub> różnych nośników energii [17]

#### 10.3.4. Generatory CHP z ogniwami paliwowymi

Generatory CHP mogą pracować jako pierwotne źródła energii, źródła energii włączone w sieć oraz jako urządzenia UPS. Ze względu na brak infrastruktury wodorowej, generatory CHP często są przystosowane do zasilania gazem ziemnym. Jednak w takim przypadku, generatory wykorzystują wysokotemperaturowe ogniwa paliwowe pozwalające na wewnętrzny reforming gazu w celu uzyskania wodoru, lub konieczne jest zastosowanie tzw. procesora paliwowego (reformera) wytwarzającego wodór z gazu ziemnego. Zastosowanie wysokotemperaturowego ogniwa paliwowego typu SOFC wiąże się ze zmniejszeniem wpływu szybkości reakcji generatora na zmianę obciążenia oraz wydłużeniem czasu rozruchu. Z kolei zastosowanie reformera w ogniwie typu PEMFC zwiększa koszt generatora i zmniejsza jego sprawność, ze względu na dodatkową ilość energii wymaganą przez reformer. Optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie generatora wytwarzającego energię bezpośrednio z czystego wodoru. Wówczas nie występuje lokalna produkcja związków węgla, generator nie wymaga implementacji dodatkowego urządzenia przez co konstrukcja jest prostsza, przy jednoczesnym obniżeniu ceny generatora. Przeszkodą w stosowaniu jest brak infrastruktury wodorowej i konieczność składowania wodoru w zbiorniku, co ogranicza możliwość ciągłej pracy generatora. Ograniczenia te są bezpośrednio powiązane z niedawnym pojawieniem się technologii ogniw paliwowych na rynku. Należy jednak traktować opisywaną technologię jako kolejną generację urządzeń wytwarzających energię. Zastosowanie generatorów CHP z ogniwami paliwowymi pozwoli na lepsze wykorzystanie surowców energetycznych dzięki wysokiej sprawności urządzenia i zmniejszeniu strat wynikających z przesyłu energii na dalekie odległości [18].

W Europie i Japonii jest już zainstalowanych około 2 tys. generatorów CHP (głównie wykorzystujących ogniwa typu PEMFC), ale jeszcze nie można nazwać ich w pełni komercyjnymi. Obecnie eksploatowane systemy charakteryzują się niestety



wysokimi kosztami całego układu oraz małą żywotnością samych ogniwi, które w ciągu kilku lat pracy zużywają się i tracą swoje początkowe parametry [19].

#### 10.3.4.1. Generatory CHP z ogniwami typu PEMFC

Przez wiele lat ogniwa typu PEMFC były uważane za najbardziej odpowiednie do zastosowań w generatorach CHP. Uważano także, że wykorzystanie ich do zasilania pojazdów (duża skala produkcji) przyczyni się do znacznego obniżenia ich ceny, co znacznie zredukowałoby również koszty generatorów CHP. Jednak te przewidywania się nie sprawdziły, gdyż ogniwom stosowanym w przemyśle samochodowym stawiane są inne wymagania (szybka reakcja na nagłe zmiany obciążenia) niż ogniwom w generatorach CHP (duża sprawność całkowita) [19].

W tablicy 10.3.2 przedstawiono porównanie generatorów CHP trzech producentów z ogniwami typu PEMFC zasilanymi gazem ziemnym.

Tablica 10.3.2. Porównanie generatorów CHP z ogniwami typu PEMFC [12, 20, 21]

| Generator CHP                   |           | Producent A                     | Producent B       | Producent C       |
|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| Dane techniczne                 | Jednostka | Wartość                         | Wartość           | Wartość           |
| Elektryczna moc wyjściowa       | kW        | 2,5 ÷ 4,1                       | 0,3 ÷ 1           | 0,5 ÷ 4,6         |
| Moc wyjściowa                   | kW        | 5,2 ÷ 9,8                       | brak danych       | brak danych       |
| Sprawność elektryczna/całkowita | %         | 25/80                           | 38/88             | 30/85             |
| Paliwo                          | -         | gaz ziemny                      | gaz ziemny        | gaz ziemny        |
| Wymiary (szer./dł./wys.)        | mm        | 930/1647/1740                   | 780/400/860       | 710/1010/1220     |
| Masa                            | kg        | 800 - w tym masa reformera: 350 | 125               | 250               |
| Parametry sieciowe              | V/Hz      | 230/50                          | 100/50 lub 200/60 | 120/60 lub 230/50 |

#### 10.3.4.2. Generatory CHP z ogniwami typu SOFC

Ogniwa typu SOFC zaczęto stosować w generatorach CHP dużo później niż ogniwa typu PEMFC, głównie z powodu ich wysokiej temperatury pracy i długiego czasu uruchomienia. Jednak możliwość osiągania dużych sprawności oraz zdolność do wewnętrznego reformingu, mogą uczynić je wiodącymi w zastosowaniach CHP [19].

W tablicy 10.3.3 przedstawiono porównanie generatorów CHP trzech producentów wyposażonych w ogniwa typu SOFC, z gazem ziemnym lub propanem, jako paliwem.

Tablica 10.3.3. Porównanie generatorów CHP z ogniwami typu SOFC [22, 23,24]

| Generator CHP                   |           | Producent D        | Producent E | Producent F  |
|---------------------------------|-----------|--------------------|-------------|--------------|
| Dane techniczne                 | Jednostka | Wartość            | Wartość     | Wartość      |
| Elektryczna moc wyjściowa       | kW        | 1 ÷ 2,5            | 2           | 1            |
| Moc wyjściowa                   | kW        | 1                  | 0,3 ÷ 1     | 2,5          |
| Sprawność elektryczna/całkowita | %         | 30/90              | 60/85       | 30/90        |
| Paliwo                          | -         | gaz ziemny, propan | gaz ziemny  | gaz ziemny   |
| Wymiary (szer./dł./wys.)        | mm        | 711/914/863        | brak danych | 550/550/1600 |
| Masa                            | kg        | 320                | 200         | 170          |
| Parametry sieciowe              | V/Hz      | 120/60 lub 230/50  | 230/50      | 230/50       |

#### 10.3.4.3. Porównanie generatora CHP współpracującego z kotłem kondensacyjnym

Generator CHP może pokryć znaczną część zapotrzebowania obiektu na energię ciepłą i elektryczną. Ale ulegające silnym wahaniom, a w momentach szczytu bardzo duże zapotrzebowanie na energię elektryczną, a także energię ciepłą oraz wysokie koszty układów z ogniwami paliwowymi – które utrzymają się przynajmniej w najbliższych latach – sprawiają, że nie warto projektować ogniw działających w szczytowym obciążeniu ani instalować drogich akumulatorów. Praca równolegle z istniejącą siecią elektryczną oraz z pomocniczym urządzeniem grzewczym (np. kotłem kondensacyjnym) jest najbardziej opłacalnym rozwiązaniem [12]. W tablicy 10.3.4 porównano parametry tych urządzeń zasilanych gazem ziemnym. Z danych tych wynika, że czas uruchomienia generatora CHP jest bardzo długi (nawet do 150 minut), natomiast kocioł kondensacyjny działa bezpośrednio po podłączeniu go do sieci elektrycznej. Generator (stos ogniw paliwowych) ma także niewielką trwałość – jego czas pracy wynosi około 5000 godzin.

Tablica 10.3.4. Porównanie generatora CHP z kotłem kondensacyjnym [12]

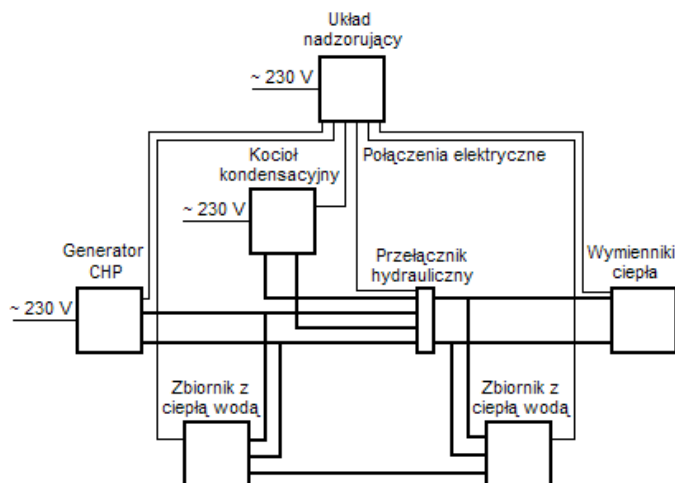
| Dane techniczne                       | Jednostka | Generator CHP<br>(Producent A)     | Kocioł<br>kondensacyjny<br>(Producent A) |
|---------------------------------------|-----------|------------------------------------|------------------------------------------|
| Moc wyjściowa<br>(40/30 °C)           | kW        | 5,2 ÷ 9,8                          | 8,3 ÷ 22,5                               |
| Zużycie gazu ziemnego<br>(9,5 kWh/m³) | m³/h      | 1,8                                | 2,3                                      |
| Zużycie gazu ziemnego<br>(8,1 kWh/m³) | m³/h      | 2,1                                | 2,7                                      |
| Max. temp. wody grzewczej             | °C        | 75                                 | 85                                       |
| Ilość skraplanej wody                 | l/h       | mała                               | 1,9                                      |
| Połączenie elektryczne                | V/Hz      | 230/50                             | 230/50                                   |
| Pobór mocy przy<br>uruchamianiu       | W         | 1000                               | 45                                       |
| Czas uruchomienia                     | min       | 60 ÷ 150                           | -                                        |
| Czas uruchomienia cyklu               | min       | < 2                                | -                                        |
| Trwałość                              | h         | > 5000                             | -                                        |
| Wymiary (szer/dł/wys)                 | mm        | 930/1647/1740                      | 570/691/1257                             |
| Masa całkowita                        | kg        | 800 - w tym masa<br>reformera: 350 | 200                                      |

#### 10.3.4.4. Obwód ciepłej wody z generatorem CHP

Przykładowy schemat obwodu ciepłej wody z generatorem CHP przedstawiono na rysunku 10.3.4. Generator CHP i pomocnicze urządzenie grzewcze są połączone równolegle. Przelącznik hydrauliczny służy do rozłączania obwodu pomocniczego urządzenia grzewczego (lub generatora) od innych obwodów systemu. Za pomocą czujnika pomiarowego umieszczonego przy przelączniku hydraulicznym kontrolowane jest dostarczanie ciepła przez dwa urządzenia grzewcze. System grzewczy jest kontrolowany przez specjalne urządzenie (układ nadzorujący) zawierające odpowiednie oprogramowanie, za pomocą którego jest kontrolowane wytwarzanie określonej ilości ciepła i energii elektrycznej przez generator CHP oraz ilość ciepła wytwarzana przez konwencjonalne urządzenie grzewcze. Układ nadzorujący może za pomocą przelącznika hydraulicznego odłączać obwód grzewczy i obwód zbiornika magazynującego ciepłą wodę tak, aby woda powracająca do ogniwa paliwowego miała temperaturę mniejszą od 55°C. W przeciwnym razie ogniwo byłoby przegrzewane (dopuszczalna jest temperatura 65°C ale w krótkim okresie czasu – maksymalnie do 30 minut). Odpowiednia kontrola zbiornika magazynującego ciepłą wodę (przelaczanie do pomocniczego zbiornika magazynującego lub obwodu grzewczego) może wydłużyć czas korzystania z ciepłej wody. Ponieważ częste włączanie i wyłączanie ogniwa paliwowego prowadzi do szybkiego starzenia się reformera, układ nadzorujący ocenia czy w danym momencie uruchomienie ogniwa jest sensowne.

Generator może działać w trzech trybach pracy. W trybie pierwszym ogrzewanie pomieszczeń oraz ciepła woda użytkowa są ważniejsze niż wytwarzanie elektryczności. Latem zapotrzebowanie na ciepłą wodę jest zaspokajane przez konwencjonalne urządzenie grzewcze, natomiast w zimie głównym urządzeniem podgrzewającym wodę jest generator CHP. W drugim trybie pracy najważniejsze jest wytwarzanie energii elektrycznej przez generator. W trybie trzecim ilość wytwarzania energii elektrycznej jest uzależniona od sprzężenia z publiczną siecią elektryczną.

Generator jest połączony równolegle z publiczną siecią doprowadzającą energię elektryczną. W przypadku, gdy zapotrzebowanie na energię jest większe niż generator jest w stanie wytworzyć, wtedy prąd jest dostarczany z sieci publicznej. Jeśli natomiast generator wytwarza większą ilość energii niż potrzeba, wtedy jest ona oddawana do sieci. Może wystąpić taki przypadek (w zależności od operatora sieci), że cała energia produkowana przez ogniwo paliwowe będzie dostarczana do sieci publicznej [12].



Rys. 10.3.4. Przykładowy schemat obwodu przygotowania ciepłej wody użytkowej z generatorem CHP [12]

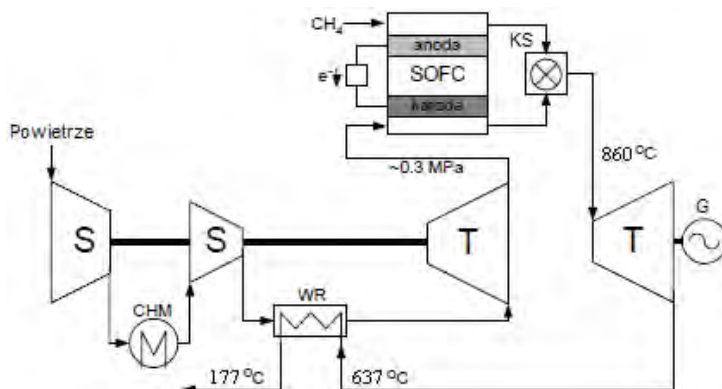
### 10.3.5. Układy hybrydowe z ogniwami typu SOFC

Znaczny postęp w udoskonalaniu ogniw paliwowych oraz rosnąca podaż urządzeń na rynku spowodowały, że coraz częściej rozważa się różnego rodzaju konfiguracje układów energetycznych budowanych z tymi ogniwami, m.in. popularne stają się układy hybrydowe z ogniwami paliwowymi i turbinami gazowymi. Uzyskują one sprawność wytwarzania energii elektrycznej nawet na poziomie 72%.

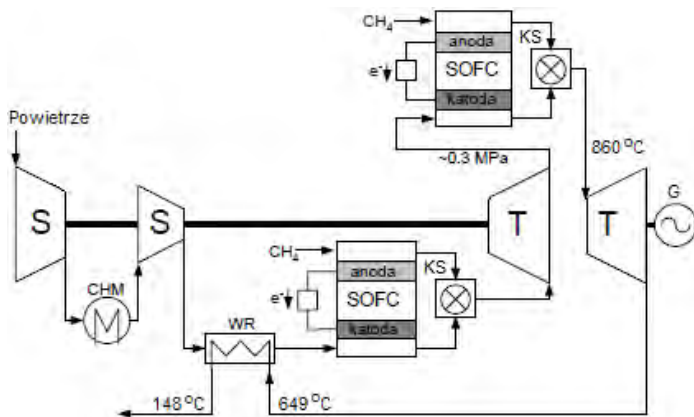
Konstruowanie układów hybrydowych małej mocy z ogniwami paliwowymi możliwe jest również dzięki rozwojowi turbin gazowych małej mocy i mikroturbin charakteryzujących się niską temperaturą spalin przed turbiną i wykorzystaniem regeneracji ciepła w obiegu.

Najlepiej do pracy w układach hybrydowych nadają się ogniwa paliwowe typu SOFC, ponieważ gwarantują różny możliwy poziom ciśnień roboczych. Obecnie są konstruowane ogniwa typu SOFC pracujące pod ciśnieniem nawet  $1\div 1,5$  MPa, dzięki czemu uzyskuje się wzrost mocy i sprawności ogniwa.

Przykładowe schematy układów hybrydowych przedstawiono na rysunkach 10.3.5 i 10.3.6. Układy tego typu mają moc w zakresie  $1\div 5$  MW. W systemie z jednym ogniwem powietrze sprężone w sprężarce turbiny gazowej jest podgrzewane w wymienniku regeneracyjnym i wstępnie rozprężane w turbinie wysokoprężnej. Po rozprężeniu do wymaganego ciśnienia powietrze jest wprowadzane do wymiennika regeneracyjnego, służącego do podgrzewania powietrza zasilającego ogniwo paliwowe [11].



Rys. 10.3.5. Układ hybrydowy z jednym ogniwem typu SOFC (S – sprężarka, T – turbina, WR – wymiennik regeneracyjny, KS – komora spalania, CHM – chłodnica międzystopniowa) [11]



Rys. 10.3.6. Układ hybrydowy z dwoma ogniwami typu SOFC, każde pracujące przy innym ciśnieniu roboczym (S – sprężarka, T – turbina, WR – wymiennik regeneracyjny, KS – komora spalania, CHM – chłodnica międzystopniowa) [11]

Każdy z tych układów posiada własną charakterystykę energetyczną, która wpływa na osiągi urządzeń, bilans energii układu, całkowite zużycie paliwa oraz na końcowy efekt ekonomiczny [11].

### **10. 3.6. Inne zastosowania ogniw paliwowych**

Ogniwa paliwowe, oprócz wykorzystania ich w układach grzewczych, znalazły także inne zastosowania. Obecnie są stosowane jako źródła zasilania w telekomunikacji, źródła zasilania pomocniczego w energetyce oraz jako źródła zasilania w środkach transportu.

#### **Źródła zasilania w telekomunikacji**

Ogniwa paliwowe stają się powoli alternatywnym źródłem energii dla niewielkich urządzeń stosowanych w biurach i gospodarstwach domowych. Jeden z producentów sprzętu elektronicznego przedstawił dwa prototypowe ogniwa paliwowe służące do zasilania urządzeń przenośnych – odtwarzaczy MP3, które jako paliwo wykorzystują metanol. Jeden z odtwarzaczy ma wymiary 35 mm na 110 mm na 20 mm, a deklarowany czas pracy na zbiorniku o pojemności 3,5 ml wynosi 35 godzin. Drugi z odtwarzaczy jest wyposażony w dysk twardy i ma wymiary 65 mm na 125 mm na 28 mm. Według producenta urządzenie może działać przez 60 godzin na zbiorniku o pojemności 10 ml [25].

#### **Źródła zasilania pomocniczego w energetyce**

Zaawansowane badania i prace wdrożeniowe są prowadzone w wielu krajach świata, jednak najbliższe rozwiązań komercyjnych są programy realizowane w Europie i USA. Amerykański Departament Obrony (DoD) posiada 30 ogniw paliwowych typu PAFC o mocy jednostkowej 200 kW. Jedenaście z nich zaczęło eksploatować w 1995 roku, a pozostałe w 1997 roku. Łączny czas pracy tych ogniw przekroczył już 800 tys. godzin. Najważniejszym sponsorem badań prowadzonych w USA w zakresie ogniw paliwowych jest Departament Energii (DoE) [13].

#### **Źródła zasilania w środkach transportu**

Liczba samochodów osobowych, ciężarowych, autobusów oraz innych środków transportu wciąż wzrasta. Największe światowe zapasy ropy naftowej znajdują się na niestabilnym politycznie Bliskim Wschodzie i nie są niewyczerpalne. Znane są dobre zagrożenia dla zdrowia powodowane przez tlenki azotu i inne składniki spalin; coraz większą uwagę skupia się na emisji dwutlenku węgla potęgującego efekt cieplarniany. Potrzeba znalezienia innych rozwiązań niż silniki spalania wewnętrznego staje się więc coraz bardziej oczywista. Wprawdzie silniki spalinowe są coraz czystsze ekologicznie i bardziej sprawne, jednak korzyści niweluje gwałtowny wzrost liczby pojazdów, obserwowany zwłaszcza na rynkach azjatyckich [14].

Pierwszym pojazdem zasilanym ogniwami paliwowymi był traktor Allis Chalmers D-12 zaprezentowany w 1959 roku. Jego masa wynosiła 1270 kg i był wyposażony w alkaliczne ogniwa paliwowe AFC (Alkaline Fuel Cell). Cztery stopy (po 252 cele) dostarczały około 15 kW mocy, a paliwem był propan zmagazynowany w zbiorniku ciśnieniowym [26].

Obecnie ogniwa paliwowe znalazły zastosowanie jako źródła zasilania samochodów osobowych, autobusów, pojazdów jednośladowych, pojazdów szynowych, jednostek podwodnych oraz samolotów.

### 10.3.7. Zalety i wady ogniw paliwowych

Ogniwa paliwowe mają wiele zalet, a są to [15, 16]:

1. Względna prostota układu przetwarzania energii chemicznej na elektryczną.
2. Produkty uboczne jak  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  są czyste i bez zapachu.
3. Śladowa emisja  $SO_2$ ,  $NO_x$ , węglowodorów, tlenków węgla, cząstek stałych.
4. Niski poziom hałasu.
5. Praktycznie dowolna i zajmująca mało miejsca lokalizacja.
6. System modułowy – łatwość, szybkość i ekonomiczność budowy.
7. Łatwość rozbudowy w miarę rosnących potrzeb.
8. Mogą pracować bez przerwy o ile tylko doprowadzane jest paliwo i utleniacz.
9. Bardzo dobra regulacyjność – ogniwo paliwowe samoczynnie dobiera paliwo i utleniacz w ilościach odpowiadających obciążeniu po stronie elektrycznej.
10. Możliwość bardzo dużych przeciążeń chwilowych oraz pracy z niskimi obciążeniami.
11. Brak ruchomych części pracujących w trudnych warunkach (brak ścierania elementów, brak drgań, małe problemy wytrzymałościowe) Ruchome części posiadają tylko urządzenia wprowadzające w obieg czynnik roboczy.
12. Do produkcji (oprócz elektrod) nie jest wymagana duża precyzja.
13. Mogą być zasilane paliwem różnego rodzaju.
14. Duża sprawność przetwarzania energii chemicznej na elektryczną.
15. Sprawność ogniwa w małym stopniu zależy od wymiarów urządzenia.

Do wad ogniw paliwowych należy zaliczyć [15, 16]:

1. Stosunkowo wysoki koszt inwestycyjny.
2. Ograniczony czas pracy ogniwa.
3. Wrażliwość na zanieczyszczenie paliwa (w różnym stopniu, zależnie od typu ogniwa).
4. Drogie materiały na katalizatory.
5. Wytwarzanie prądu stałego.
6. Niskie napięcie uzyskiwane z pojedynczej celi (ok. 1V).

## 10.4. Mikroelektrociepłownie domowe

### 10.4.1. Wprowadzenie

Ograniczone zasoby energii pierwotnej, zagrożenia wywołane emisją gazów cieplarnianych, niska sprawność systemów przesyłowych energii cieplnej, wymagania wysokiej jakości energii elektrycznej przez zaawansowane technologie przemysłowe i informatyczne wymuszają poszukiwania innych sposobów wytwarzania, przesyłania i użytkowania energii elektrycznej i cieplnej.

Szybki rozwój terenów zurbanizowanych spowodował wzrost zapotrzebowania na moc i energię elektryczną. W poszukiwaniu efektywnych metod ochrony środowiska oraz powstrzymania jego dalszej degradacji środowiska

naturalnego, zwrócono szczególną uwagę na odnawialne źródła energii oraz generację rozproszoną.

Jednym z rozwiązań jest idea generowania energii elektrycznej i ciepła bezpośrednio w mieszkaniu, a szczególnie w domu jednorodzinnym, pod nazwą „elektrociepłownie domowe” ( power plant for home) lub Mikro Combined Heat and Power – Mikro-CHP.

W najbliższych latach konieczność zastosowania nowych technologii w sektorze energetyki będzie nieunikniona. Dokument rządowy „Polityka energetyczna Polski do 2030 roku” przewiduje zwiększenie całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną z poziomu 146 TWh/rok w 2005 roku do 280 TWh/rok w 2030 roku [2].

Skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej (ang. Combined Heat and Power) najczęściej definiuje się jako proces, w którym energia pierwotna zawarta w paliwie jest jednocześnie zamieniana na dwa produkty: ciepło i energię elektryczną.

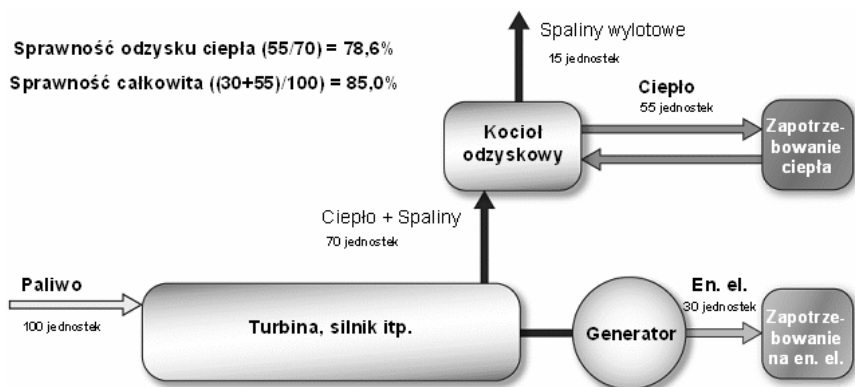
Wytwarzanie i eksploatację takich urządzeń podjęto w latach 2003 – 2006 w Japonii, Stanach Zjednoczonych i Niemczech. Rozwiązanie takie podnosi stopień wykorzystania energii cieplnej oraz eliminuje straty przesyłu energii cieplnej i elektrycznej. Mimo mniejszej sprawności generacji energii elektrycznej całkowita sprawność mikro-kogeneracji domowej jest znacznie większa niż dużych systemów elektroenergetycznych. System Mikro-CHP podnosi bezpieczeństwo energetyczne, zmniejsza zapotrzebowanie na energię elektryczną wysokiej jakości konieczną dla zaawansowanych technologii przemysłowych, ułatwia także wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych. Źródłem energii pierwotnej może tu być gaz naturalny, gaz ciekły, paliwa ropopochodne, wodór (ogniwa paliwowe), biogaz, biomasa, biopaliwa ciekłe.

Wspieranie skojarzonego wytwarzania ciepła oraz energii elektrycznej jest i będzie jednym z priorytetowych przedsięwzięć polityki energetycznej wszystkich krajów europejskich. W tym celu stworzono Dyrektywę 2004/8/EC, której głównym zadaniem jest promocja kogeneracji CHP. Dyrektywa ta została opublikowana w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej 11 lutego 2004 roku. W Polsce została wdrożona przez ustawę z dnia 12.001.2007 roku, zastępując ustawy: Prawo energetyczne, Prawo ochrony środowiska oraz ustawę o systemie zgodności.

Podstawowym celem mikro-kogeneracji jest wzrost sprawności energetycznej oraz umocnienie bezpieczeństwa energetycznego poprzez rozwijanie wysokosprawnego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej w skojarzeniu. Wyrażenie „wysokosprawna kogeneracja” ma na celu określenie podstawowego kryterium odróżniająca kogenerację zwykłą od wysokosprawnej. Zgodnie z tą definicją oszczędność w zużyciu paliw pierwotnych w porównaniu z rozdzielonym wytwarzaniem ciepła i energii elektrycznej, powinna wynosić przynajmniej 10%. Jako kryterium przyjmowano całkowitą sprawność wykorzystania energii chemicznej paliwa [27].

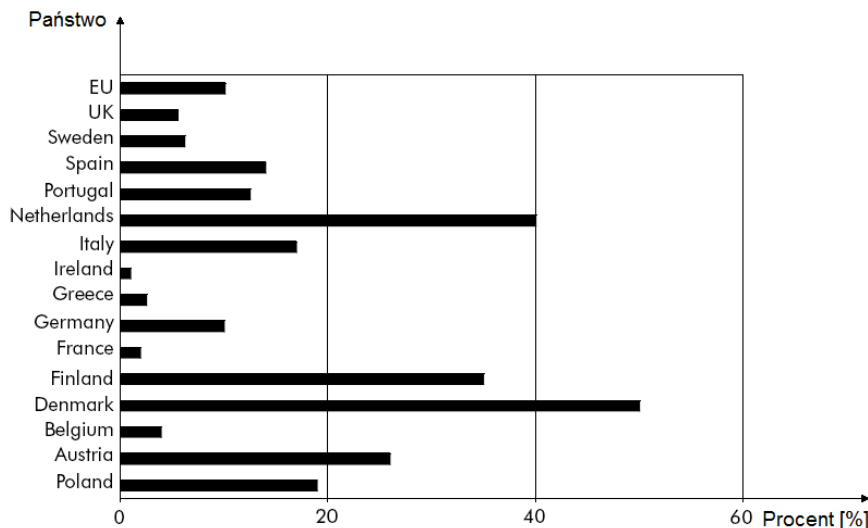
Z technicznego punktu widzenia energię elektryczną i ciepło można produkować w układach rozdzielonych (w elektrowniach oraz ciepłowniach) oraz układach skojarzonych (głównie w elektrociepłowniach). Energetyka zawodowa i przemysłowa w Polsce i na świecie produkuje energię elektryczną i ciepło od bardzo dawna głównie w oparciu o paliwa kopalne, tj.: węgiel, gaz ziemny oraz inne paliwa [32].





Rys. 10.4.1. Idea działania mikro-CHP [11].

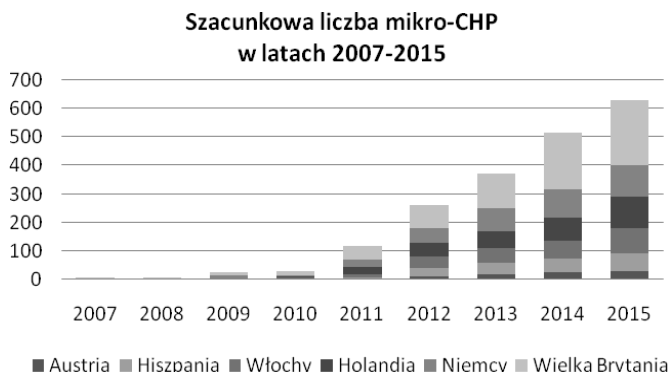
Udział energetyki skojarzonej w elektrociepłowniach zawodowych i przemysłowych poszczególnych krajów Unii Europejskiej został przedstawiony w bilansie energetycznym (Rys. 10.4.2). Produkcja w skojarzeniu w Polsce plasuje się na 5 miejscu po Danii, Holandii, Finlandii oraz Austrii.



Rys.10.4.2. Procentowy bilans energetyczny wybranych krajów Unii Europejskiej w elektrociepłowniach wyposażonych w tradycyjne układy węglowo-parowe [34].

Udział Polski w układach mikro-kogeneracyjnych do 1 kW niestety jest niewielki, największe zainteresowanie układami mikro-kogeneracyjnymi jest w Wielkiej Brytanii, Niemczech, Holandii, Włoszech, Hiszpanii oraz w Austrii.

Rys. 10.4.3 przedstawia prognozę planowanych instalacji urządzeń mikro-kogeneracyjnych.



Rys.10.4.3. Szacunkowa liczba zainstalowanej i prognozowana liczba urządzeń mikro-kogeneracyjnych w poszczególnych państwach europejskich.

Wypromowanie układów kogeneracyjnych ma szansę rozwinąć się w trudnej sytuacji gospodarczej na świecie oraz przy ewentualnym nasileniu ataków terrorystycznych. Ewentualne ataki na strategiczne miejsca energetyczne, mogą mieć katastrofalne skutki dla państw wysoko rozwiniętych.

#### 10.4.1.1. Definicja Micro-CHP

Definicja skojarzonego wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej (ang. Combined Heat and Power) jest opisywana skrótem CHP, a także jest nazywana jako kogeneracja (ang. Cogeneration).

Idea działania systemu CHP polega na równoczesnej produkcji dwóch lub więcej typów energii użytkowej z pojedynczego źródła energii i wykorzystaniu ciepła odpadowego z urządzeń wytwarzających energię elektryczną.

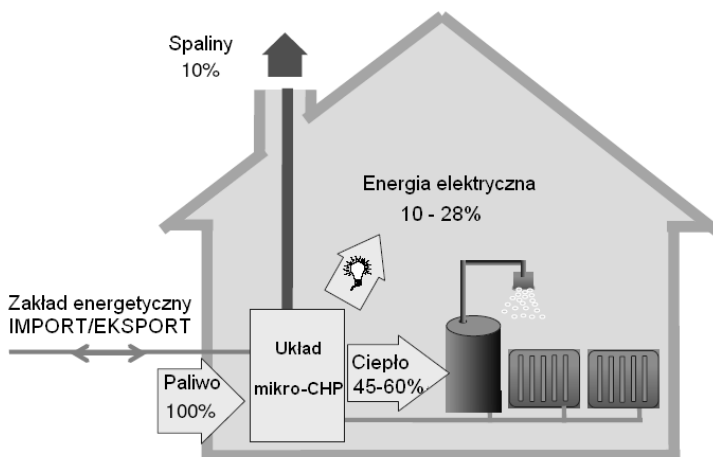
W literaturze pojawiają się różne określenia dotyczące mikro-kogeneracji. Ostatecznie niejasności te wyjaśniła wspomniana we wstępie Dyrektywa 2004/8/EC. W myśl tej dyrektywy przyjęto następującą definicję kogeneracji:

- mikro-kogeneracja oznacza produkcję energii skojarzoną z maksymalną wydajnością poniżej 50 kW<sub>el</sub>,

- „small scale” kogeneracja oznacza produkcję skojarzoną z mocą zainstalowaną poniżej 1 MW<sub>el</sub>.

W porównaniu z konwencjonalnym kotłem grzewczym, urządzenia kogeneracyjne zostały wyposażone w elektryczny generator z dodatkowym wymiennikiem ciepła, który odzyskuje poniesione straty podczas pracy. Dlatego też efektywność urządzenia wzrasta do co najmniej 80%. Energia elektryczna wygenerowana w nadmiarze może zostać dostarczona do zakładu energetycznego.

Często autorzy w wielu publikacjach pisząc o mikro-kogeneracji odnoszą się głównie do urządzeń z mocą zainstalowaną do 15 kW<sub>el</sub>.



Rys.4. Schemat działania układów mikro-kogeneracyjnych [10].

W celu racjonalnego wykorzystania tej mocy, należy poprzeć to następującymi argumentami:

- skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej mniejszej od  $15 \text{ kW}_{\text{el}}$  stosowane jest w pojedynczych budynkach m, czyli: małe hotele, małe budynki przedsiębiorcze, apartamenty, które mogą zaopatrywać najbliższe otoczenie budynków w ciepło i energię elektryczną,
- systemy do  $15 \text{ kW}_{\text{el}}$  różnią się znacznie od tych dużych stosowanych przez elektrociepłownie. Systemy poniżej  $15 \text{ kW}_{\text{el}}$  mogą być podłączone bezpośrednio do sieci trójfazowej niskiego napięcia.

W centralnej Europie układy mikro-kogeneracyjne mają zastosowanie głównie w budynkach: mieszkalnych podmiejskich oraz wiejskich, dostarczając ciepło podobnie jak konwencjonalny kocioł. Układy kogeneracyjne pracują równolegle, czyli jednocześnie mogą pobierać energię pierwotną z zakładu energetycznego, a także eksportować jej nadwyżkę do zakładu. Zapewnia to wysoką sprawność oraz oszczędność w zapotrzebowaniu na paliwo pierwotne. Paliwem tych układów mikro-kogeneracyjnych mogą być: gaz naturalny, lekki gaz olejowy, biomasa, olej rzepakowy czy odpady komunalne.

Zastosowanie mikrokogeneracji daje duże możliwości małym podmiotom. Dlatego obok dużych elektrociepłowni zawodowych i przemysłowych na świecie coraz większą popularnością cieszą się małe układy skojarzone ( $50 \text{ kW} \div 3 \text{ MW}$ ). Pozwalają one na zastosowanie skojarzonego wytwarzania w małych urządzeniach wszędzie tam, gdzie występuje niewielkie zapotrzebowanie na moc cieplną i elektryczną w pojedynczych obiektach (szkoła, szpital) lub grupach obiektów (małe osiedle mieszkaniowe). Małe układy skojarzone zasilane są głównie gazem, czasem paliwem olejowym, więc ich stosowanie korzystnie wpływa na strukturę zużycia paliw w systemach energetycznych poszczególnych państw. Wynikają z tego dodatkowe zalety: łatwość pozyskania i transportu paliwa o dużej wartości opałowej, prostota prowadzenia procesu spalania, brak odpadów stałych i obniżona emisja szkodliwych substancji do otoczenia.

Stosowane technologie skojarzonego wytwarzania są korzystne zarówno z ekonomicznego, jak i ekologicznego punktu widzenia. Można je zastosować wszędzie tam, gdzie równocześnie występuje zapotrzebowanie na ciepło i energię elektryczną, a inwestowanie w duży układ elektrociepłowni nie jest opłacalne lub wręcz jest możliwe. Małe układy skojarzone instalowane są przede wszystkim tam, gdzie przez dużą liczbę godzin w roku występuje znaczne zapotrzebowanie na ciepło grzejne i energię elektryczną.

Wśród najnowszych rozwiązań proponowane są systemy małej mocy (CHP) o mocy cieplnej poniżej 10 kW i mocy elektrycznej 1 – 5 kW dedykowane dla pojedynczego gospodarstwa domowego. Idea działania takiej „mikroelektrociepłowni domowej” polega na umiejscowieniu zarówno źródła energii elektrycznej jak i cieplnej wewnątrz zasilanego budynku co eliminuje całkowicie straty ciepła oraz koszty przesyłu. Schemat działania takiego układu pokazano na rysunku 10.4.2.

W systemie CHP energia pierwotna w postaci gazu ziemnego i płynnego, oleju napędowego, biomasy i in., jest przetwarzana na energię elektryczną i ciepłą. Sprawność całkowita układu CHP wynosi ok. 90 %. Energia elektryczna wytwarzana jest w turbinie której sprawność zawiera się w przedziale 10 – 45 %. Ciepło uzyskiwane w efekcie spalania paliw jest odzyskiwane w systemie wymienników ciepła i stanowi 45 – 80 % energii pierwotnej. Ciepło wykorzystywane jest do ogrzania wody użytkowej oraz w systemie ogrzewania centralnego.

Podział energii na ciepło i prąd elektryczny wynika z uwarunkowań klimatycznych i geograficznych, tzn. w okresach kiedy nie potrzebna jest energia na ogrzewanie mieszkania (miesiące letnie), system ukierunkowany jest na wytwarzanie energii elektrycznej, natomiast w okresach wzmożonego zapotrzebowania na ciepło wzrasta udział procentowy wytwarzania energii cieplnej w stosunku do elektrycznej. Istnieje więc możliwość sprzedaży nadwyżki energii elektrycznej do systemu energetycznego lub wyłączenia niektórych elementów systemu i zakupu energii elektrycznej z sieci w okresach większego zapotrzebowania na energię elektryczną.

#### **10.4.1.2. Technologia Micro-CHP**

W perspektywie potrzeby poszukiwania alternatywnych rozwiązań powstały lub nadal trwają prace nad ciągle to nowszymi systemami stosowanych w układach skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Istotną cechą układów mikro-kogeneracyjnych jest niezależność pracy urządzenia. Oznacza to, że jest możliwe wytwarzanie energii elektrycznej przy całkowitym braku zapotrzebowania na ciepło, bez zmiany sprawności wytwarzania energii elektrycznej.

#### **Rodzaje układów Micro-CHP**

Obecnie możemy wyróżnić kilka głównych systemów, w oparciu o ich budowę:

- silniki tłokowe,
- mikro-turbiny gazowe,
- układy z silnikami Stirlinga,
- organiczny obieg Rankine'a,
- ogniwa paliwowe.

Tabela 10.4.1. Stosowane paliwa i technologie CHP

|                               | <b>Paliwo<br/>pierwotne</b> | <b>Zakres mocy<br/>(MWe)</b> | <b>Sprawność<br/>elektryczna</b> | <b>Sprawność<br/>całkowita</b> | <b>Ciepło</b>                                                          |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Turbina gazowa                | Gaz                         | 0.3 – 50                     | 25 -42%                          | 65-87%                         | Wysoka jakość pary wodnej lub gorący gaz                               |
| Silnik Diesla                 | Olej napędowy               | 0.2 – 20                     | 35-45%                           | 65-90%                         | Niskie ciśnienie pary wodnej, niska i średnia temperatura ciepłej wody |
| Piec gazowy                   | Gaz, biogaz                 | 0.003 – 6                    | 25-43%                           | 70-92%                         | Niska lub średnia temperatura ciepłej wody                             |
| Technologia ogniów paliwowych | Naturalny gaz, wodór        | 0.001 – 100                  | 40-60%                           | 90%                            | Para wodna lub gorąca woda                                             |
| Mikro- turbiny gazowe         | Gaz, olej napędowy, biogaz  | 0.03 – 1                     | 27%                              | 90%                            | Gorące spaliny lub gorąca woda                                         |
| Silnik Stirlinga              | Różne typy paliwa           | 0.001–0.005                  | 10-15%                           | 95%                            | Gorąca woda                                                            |

W pierwszej tabeli zostały przedstawione systemy zasilane różnymi paliwami. najniższą sprawność elektryczną ma technologia ogniów paliwowych (40%-60%), natomiast pozostałe są w granicach (20-45%). Natomiast wszystkie układy mają już wysoką sprawność całkowitą, która waha się w granicach (65-95%).

Silniki tłokowe spalinowe są często stosowane w układach skojarzonych małej mocy. Urządzenia te mają wysoką sprawność oraz niskie koszty inwestycyjne. Są stosowane najczęściej do produkcji gorącej wody, ciepło te odzyskuje się na kilku różnych poziomach temperatury, natomiast znaczna część tego ciepła (ok. 50%) odzyskiwana jest w zakresie niskich temperatur.

Ze względu na konstrukcję oraz różne paliwa pierwotne, silniki tłokowe można podzielić na grupy: silniki wysokoprężne oraz silniki gazowe z zapłonem iskrowym.

Obecnie wysiłki prac badawczo-rozwojowych są skupione na konstrukcji mikro-turbiny o mocy wyjściowej kilku kilowatów. Dotychczas turbiny gazowe pracują zazwyczaj w układzie otwartym i ze spalaniem zewnętrznym, jednak brane są także pod uwagę instalacje otwarte ze spalaniem wewnętrznym.

Koszty inwestycji tego typu silników w porównaniu z silnikami tłokowymi są nadal wyższe, jednak posiadają szereg zalet: niezawodność, niewielkie rozmiary, małą masą, czy niską emisją hałasu, mogą znaleźć zastosowanie w budynkach użyteczności publicznej.

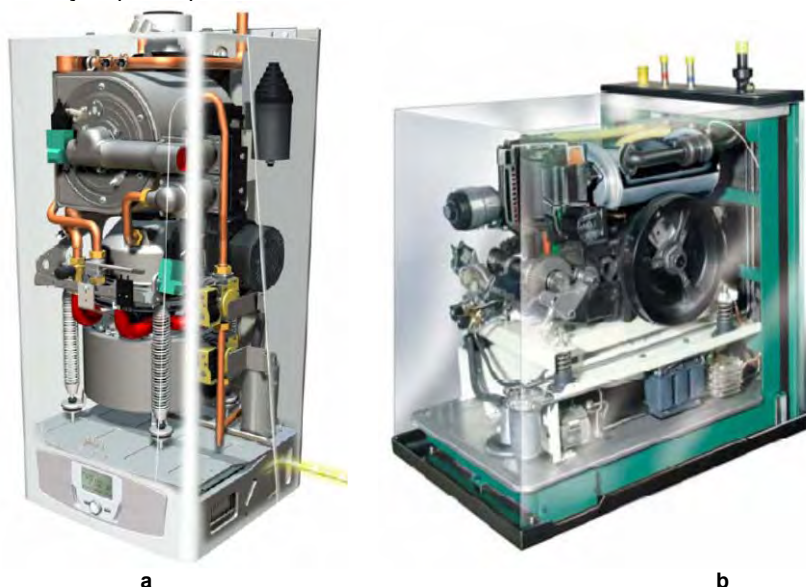
Zastosowanie silnika Stirlinga w skojarzonym wytwarzaniu ciepła i energii elektrycznej o mocy 1 kW<sub>el</sub> pozwala na uzyskanie dobrych parametrów: wysoką sprawność wytwarzania energii elektrycznej, niski poziom hałasu, możliwość różnej konfiguracji silników, wysoką trwałość oraz niski wskaźnik emisji.

Jednym z istotniejszych elementów pracujących w obiegu jest regeneratory,

który przejmie ciepło od czynnika roboczego w czasie jego przepływu z przestrzeni ogrzewanej do chłodzonej. Zastosowanie instalacji organicznego obiegu Rankine'a ORC (ang. Organic Rankine Cycle) pozwala przetworzyć ponad 70% energii cieplnej na energię elektryczną. Układy ORC są podobne do obiegu konwencjonalnej turbiny parowej, z wyjątkiem płynu napędzającego turbinę. Wyselekcjonowane płyny pozwalają na wydajną pracę przy niskich temperaturach energii cieplnej w celu produkowania energii elektrycznej w szerokim zakresie mocy wyjściowej (od kilku kW<sub>el.</sub> do 3 MW<sub>el.</sub> na jednostkę).

Główne techniczne zalety obiegu Rankine'a to: wysoka wydajność obiegu, bardzo wysoka wydajność turbiny (do 85%), mały mechaniczny nacisk turbiny z powodu małej prędkości obrotowej turbiny (umożliwiający bezpośredni napęd elektrycznego generatora), długa żywotność, brak konieczności czuwania przy systemie, a także proste procedury start-stop, ciche działanie, minimalne zapotrzebowanie bytowe oraz dobre osiągi częściowe [30].

Obecnie systemy mikro-kogeneracyjne z wykorzystaniem ogniw paliwowych są w fazie prac badawczo-rozwojowych i wymagają dalszych udoskonaleń. Obecnie oferowany jest przez Baxi Innotech CHP o mocy 1 kW<sub>el.</sub> na ogniach polimerowych (PEM) oraz przez Ceramic Fuel Cells CHP o mocy 2 kW<sub>el.</sub>, a ogniach paliwowych tlenkowych (SOFC).



Rys. 10.4.5. Silnik Stirlinga w: a) Baxi Ecogen; b) Dachs

### Przykłady oferowanych agregatów CHP

Na całym świecie od kilku lat można zaobserwować wzrost zainteresowania tematyką związaną z odnawialnymi źródłami energii, oraz układami kogeneracyjnymi. Wprowadzono na rynek różne układy skojarzonej produkcji ciepła

i energii elektrycznej. Najbardziej znane to: WhisperGen (firmy Whisper Tech), Baxi Ecogen (Baxi Group), Deluxe (Honda), Aisin (Toyota), SenerTech (Dachs), Ecopower (Vaillant). Podstawowe parametry tych urządzeń podano w tabl. 10.4.2.

Tablica 10.4.2. Porównanie układów mikro-kogeneracyjnych ze względu na moc oraz zastosowanie.

| Typ                            | WhisperGen       | Ecogen           | Aisin          | Dachs         |
|--------------------------------|------------------|------------------|----------------|---------------|
| Producent                      | WhisperGen Ltd   | Baxi Group       | Toyota         | Senertec GmbH |
| Zasada działania               | Silnik Stirlinga | Silnik Stirlinga | Silnik tłokowy | Silnik Otto   |
| Maksymalna en. El, kW          | 1,0              | 1,0              | 6,0            | 5,5           |
| Maksymalna energia cieplna, kW | 7,5-14,0         | 3,5-24           | 13,5           | 12,5-20,5     |
| Sprawność elektryczna, %       | 12               | 14               | 26,5%          | 27%           |
| Sprawność całkowita, %         | 90               | 91               | 85%            | 88%           |
| Wymiary, m                     | 0,48x0,64x0,56   | 0,95x0,45x0,43   | 0,66x1,1x1,5   | 0,72x1,0x1,07 |
| Waga, kg                       | 150              | 110              | 465            | 530           |
| Poziom hałasu, dB              | <55              | 45               | 55             | 52-56         |

Urządzenia z pierwszej grupy mają niewielką masę oraz wymiary, co sprawia, że można zainstalować je w kuchni. Z kolei dla urządzeń z drugiej grupy należy zaplanować instalację w oddzielnym pomieszczeniu gospodarczym.

#### 10.4.1.3. Efektywność obecnie oferowanych systemów CHP

Technologie skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w CHP mogą być zastosowane wszędzie tam, gdzie przez dużą liczbę godzin w roku występuje znaczne zapotrzebowanie na ciepło grzejne i energię elektryczną, a jednocześnie rozproszenie obiektów zasilanych jest zbyt duże w stosunku do istniejącej infrastruktury. Urządzenia Mikro-CHP mogą również współpracować z okresowo działającymi źródłami energii odnawialnej takimi jak panele fotowoltaiczne i słoneczne, kolektory cieplne, mała elektroenergetyka wiatrowa, mała elektroenergetyka wodna, szczególnie na terenach rolniczych, wiejskich, o budownictwie rozproszonym.

Na świecie trwają intensywne prace nad zastosowaniem na małą skalę systemów do skojarzonego wytwarzania dwóch rodzajów energii – cieplnej i elektrycznej w urządzeniach instalowanych bezpośrednio w zasilanym obiekcie. Niektóre z rozwiązań znalazły już komercyjne zastosowanie a inne są w fazie testowania prototypów. Można tu wymienić urządzenia których wybrane parametry zamieszczono w tabeli 10.4.3.

Tablica 10.4.3. Urządzenia i prototypy CHP opracowywane na świecie

|                                                                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Japonia: Honda IC Engine</b><br><b><i>Silnik z wewnętrznym spalaniem /Ciepła woda/Ogrzewanie podłogowe</i></b>                   |            |
| Efektywność                                                                                                                         |            |
| - cieplna                                                                                                                           | 65 %       |
| - elektryczna                                                                                                                       | 20 %       |
| - łączna                                                                                                                            | 85 %       |
| <b>Japonia: Tokyo Gas Fuel Cell</b><br><b><i>Ogniwa paliwowe / Ciepła woda</i></b>                                                  |            |
| Efektywność                                                                                                                         |            |
| - cieplna                                                                                                                           | 45 %       |
| - elektryczna                                                                                                                       | 33 %       |
| - łączna                                                                                                                            | 78 %       |
| Moc elektryczna                                                                                                                     | 1 kW       |
| <b>Anglia: PowerGen/WhisperGen</b><br><b><i>Silnik z wewnętrznym spalaniem / Silnik Stirlinga i bojler</i></b>                      |            |
| Efektywność                                                                                                                         |            |
| - cieplna                                                                                                                           | 70-80 %    |
| - elektryczna                                                                                                                       | 10-20 %    |
| - łączna                                                                                                                            | 90 %       |
| Moc elektryczna                                                                                                                     | 1 – 1.2 kW |
| <b>USA: Massachusetts: Climate Energy Cogen Unit</b><br><b><i>Silnik z wewnętrznym spalaniem /Ogrzewanie ciepłym powietrzem</i></b> |            |
| Efektywność                                                                                                                         |            |
| - cieplna                                                                                                                           | 65 %       |
| - elektryczna                                                                                                                       | 20 %       |
| - łączna                                                                                                                            | 85 %       |
| Moc elektryczna                                                                                                                     | 1.2 kW     |

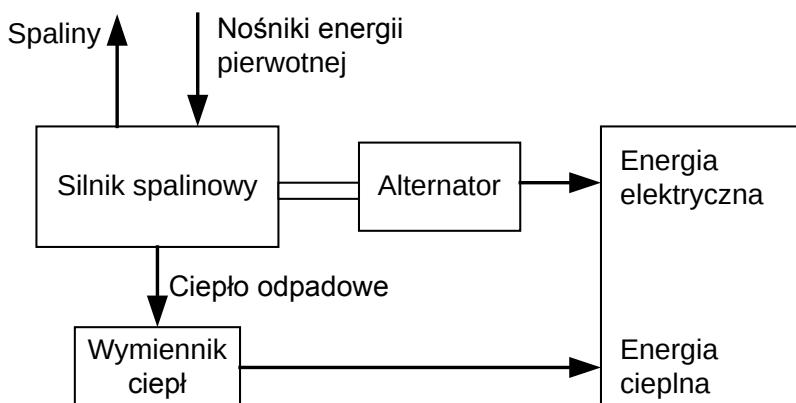
#### 10.4.2.Rozwiązania Mikro-CHP dla gospodarstw domowych

Najczęściej w proponowanych rozwiązaniach dla gospodarstw domowych jednostką prądotwórczą jest generator napędzany silnikiem spalinowym na paliwa płynne lub gazowe albo turbiną gazową. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie ogniw paliwowych. W takich systemach wytwarzane przy produkcji prądu ciepło jest odzyskiwane za pomocą wymienników ciepła.



## Silnik spalinowy

System Mikro CHP z silnikiem spalinowym. W systemie tym źródłem energii elektrycznej jest alternator napędzany tłokowym silnikiem spalinowym, lub silnikiem Stirlinga. Silnik spalinowy może być na paliwa gazowe (gaz naturalny, biogaz) lub paliwa płynne (gaz płynny, olej opałowy, olej rzepakowy). Ciepło powstałe w silniku, w efekcie spalania paliwa, odzyskiwane jest w wymiennikach ciepła i wykorzystywane w gospodarstwie domowym. Najczęściej stosowanym wymiennikiem ciepła jest chodnica wodna. Sprawność alternatora, o mocy od 1 do 5 kW, jest niewielka (20 – 30 %), ale sumaryczna sprawność generacji energii elektrycznej i cieplnej układu jest wysoka i wynosi 90 – 95 %.



Rys. 6 Układ  $\mu$ CHP z silnikiem spalinowym

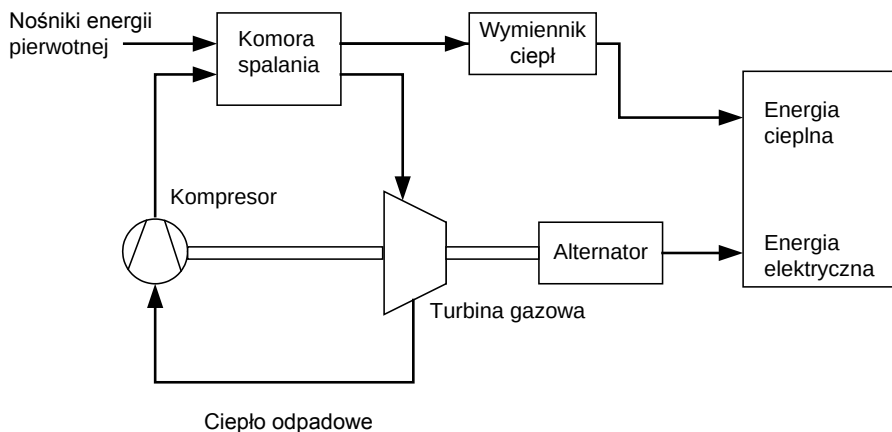
## Turbina gazowa lub silnik Stirlinga

System  $\mu$ CHP z turbiną gazową. Najprostszy obieg powietrza i spalin w systemie z  $\mu$ CHP turbiną gazową przedstawia rysunek 7. Uproszczony schemat takiego układu cieplnego obejmuje trzy podstawowe urządzenia: kompresor powietrza, komorę spalania, oraz turbinę gazową. Turbina napędza alternator wytwarzający energię elektryczną. Komora spalania opalana może być paliwem ciekłym, gazowym lub stałym (min. biomasa). Ciepło uzyskiwane w wyniku spalania paliwa, odzyskiwane jest w wodnych wymiennikach ciepła i wykorzystywane w gospodarstwie domowym.

Teoretyczny obieg powietrza składa się z trzech przemian termodynamicznych:

- izentropowe sprężanie powietrza z kompresorze od ciśnienia atmosferycznego  $p_1$  i temperatury  $T_1$  na wlocie do kompresora – do ciśnienia  $p_2$  i temperatury  $T_2$  na wylocie ze sprężarki,
- izobaryczne podgrzewanie powietrza i spalanie paliwa w komorze spalania oraz doprowadzenie spalin o temperaturze  $T_3$  do turbiny gazowej,
- izentropowe rozprężanie spalin w turbinie gazowej od ciśnienia dolotowego  $p_3 = p_2$  i temperatury dolotowej  $T_3$  do ciśnienia atmosferycznego  $p_4 = p_1$  i temperatury wylotowej  $T_4$

Zaletą tego rozwiązania jest możliwość zaadaptowania istniejącego w gospodarstwie domowym kotła centralnego ogrzewania w charakterze komory spalania. Mikroturbiny gazowe stosowane w systemach  $\mu$ CHP są mniejsze niż konwencjonalne silniki tłokowe oraz charakteryzują się niższymi kosztami kapitałowymi i konserwacji. Sprawność elektryczna układu  $\mu$ CHP z turbiną gazową wynosi od 15 – 30%, natomiast sumaryczna sprawność generacji energii elektrycznej i ciepłej wody użytkowej wynosi 65 – 90 %.



Rys.10.4.7 Układ Mikro CHP z turbiną gazową

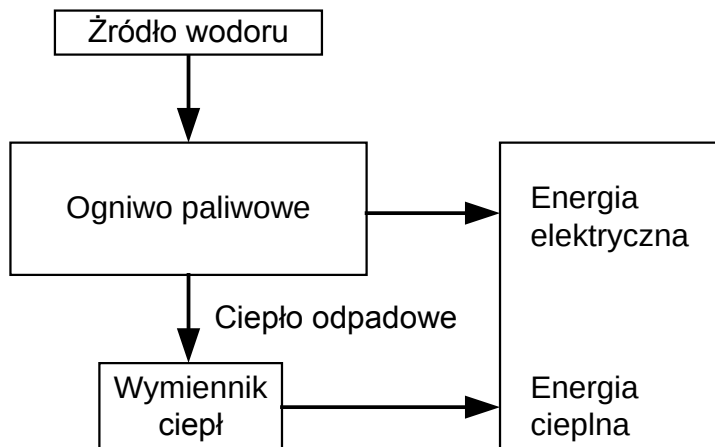
### Silnik Stirlinga

W systemie Mikro CHP z silnikiem Stirlinga przetwarzanie energii cieplnej w energię mechaniczną zachodzi bez procesu wewnętrznego spalania paliwa. Wskutek dostarczania ciepła z zewnątrz możliwe jest jego zasilanie energią pochodzącą z dowolnego źródła. Silnik Stirlinga nie ma rozrządu, nie korzysta ze spalania wybuchowego i nie ma układu wydechowego dzięki temu jest niemal bezgłośny. Natomiast jego wadą są niskie obroty, kompensowane w dużym stopniu możliwością dokładnej kontroli procesu spalania paliwa, znacznie lepszej niż w przypadku silnika tłokowego, co umożliwia utrzymanie niskiej toksyczności spalin. W silniku Stirlinga tłok jest napędzany poprzez ekspansję zamkniętego gazu, który rozpręża się dzięki doprowadzeniu ciepła z zewnętrznego źródła. Wymagane ciepło może pochodzić z różnych źródeł energetycznych np. zewnętrznej komory spalania. Dzięki ciągłemu spalaniu silniki Stirling'a charakteryzują się niską emisją substancji szkodliwych oraz niskimi nakładami na konserwację. Temperatura spalin jest w zakresie 250-300 st. C. Ciepło to jest odzyskiwane w wymienniku ciepła i wykorzystywane w gospodarstwie domowym do ogrzewania pomieszczeń i wody użytkowej.

### Ogniwa paliwowe

System Mikro-CHP z ogniwem paliwowym. Ogniwa paliwowe przekształcają energię chemiczną wodoru i tlenu bezpośrednio w energię elektryczną bez spalania

i pracy mechanicznej, jak to ma miejsce w turbinach lub silnikach. Wodór stosowany jako paliwo może być pozyskiwany z różnych źródeł, w tym z gazu ziemnego, propanu, węgla i paliw odnawialnych, takich jak biomasa lub z elektrolizy, energii wiatrowej i słonecznej. Nawet w przypadku wykorzystania jako źródła wodoru gazu ziemnego, poziomy emisji są pomijalnie małe. Ciepło przemiany chemicznej w ogniwie paliwowym odzyskiwane jest w wymienniku ciepła i wykorzystywane w gospodarstwie domowym. Sprawności energetyczna i cieplna CHP z ogniwem paliwowym wynoszą odpowiednio 33% i 40%, natomiast sumaryczna sprawność układu wynosi 78 – 80%.



Rys. 10.4.8 Układ Mikro-CHP z ogniwem paliwowym

### 10.4.3. Przegląd układów Mikro-CHP oferowanych komercyjnie

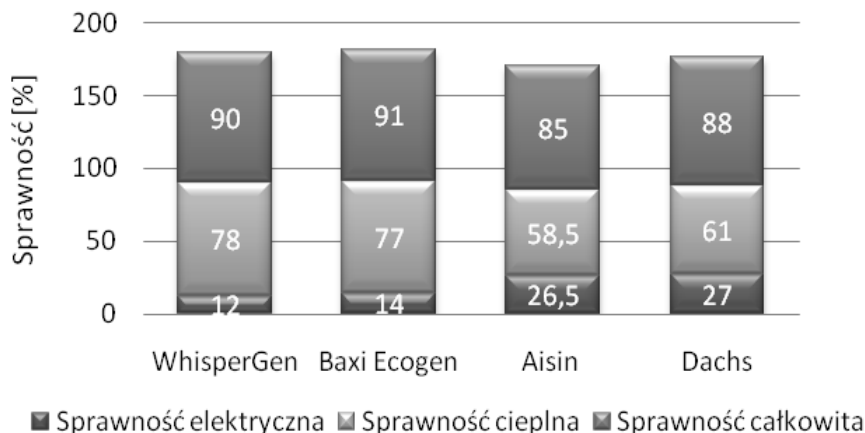
Na całym świecie od kilku lat można zaobserwować wzrost zainteresowania tematyką związaną z odnawialnymi źródłami energii, m.in. układami kogeneracyjnymi. Wprowadzono na rynek różne układy skojarzonej produkcji ciepła i energii elektrycznej. Najbardziej znane to: WhisperGen (firmy Whisper Tech), Baxi Ecogen (Baxi Group), Deluxe (Honda), Aisin (Toyota), SenerTech (Dachs), Ecopower (Vaillant).

#### 10.4.3.1. Zastosowanie ze względu na budowę układu

Urządzenia firmy Baxi Group – Baxi Ecogen z silnikiem Sterlinga, zasilanym gazem, posiada moc elektryczną od 0,2 do 1,0 kW i moc cieplną 24 kW, a całkowita sprawność wynosi 90%. Firma ta, we współpracy z SenerTech, sprzedała także do 2009 roku prawie 18 000 urządzeń o mocy elektrycznej 5,5 kW i 12,5 kW mocy cieplnej, zasilanych gazem ciekłym (LPG). Sprawność całkowita tych urządzeń wynosi 88%. Urządzenia o większej mocy (5 – 6) kW<sub>el</sub>, wykorzystywane są w budynkach biurowych i przemysłowych.

Układy mikrokogeneracji z ogniwami paliwowymi mają wyższą sprawność elektryczną (32%), a sprawność całkowitą nieco niższą niż układy z generacją maszynową.

Urządzenie Aisin posiada czterosuwowy trzycylindrowy silnik spalinowy o łącznej pojemności 953 cm<sup>3</sup> oraz wymiennik ciepła. Paliwem pierwotnym mogą być gaz ziemny oraz gaz ciekły LPG. Moc urządzenia waha się: od 1 do 6 kW mocy elektrycznej oraz 11.7 kW mocy cieplnej. Urządzenie to ma wydajność 33.5 l/min wody o temperaturze 60°C. Sprawność elektryczną wynosi 26,5%, sprawność ciepła – 58,5%, co daje całkowitą sprawność 85%. Gwarantowany okres bezawaryjnej pracy wynosi 35000 motogodzin, przy przeglądach co 10000h.



Rys.10.4.12. Porównanie sprawności w układach mikro-kogeneracyjnych oferowanych przez głównych producentów domowych mikroelektrociepłowni

Na rysunku 12 zostały przedstawione dwie grupy systemów: pierwsza do 1 kW, druga (5,5 – 6) kW. Obie charakteryzują się bardzo wysoką sprawnością całkowitą w granicy 90%. Układy niższej mocy: WhisperGen oraz Ecogen charakteryzują się niższą sprawnością elektryczną (12 – 14)%, niż urządzenia o wyższej mocy (5,5 – 6) kW, których sprawność wynosi ok. 27%. Układy o mocy 1 kW mają zastosowanie w budynkach jednorodzinnych, natomiast układy o mocy 5-6 kW - w przedsiębiorstwach, biurach itp.

W urządzeniach wykorzystujących turbinę gazową żadaną temperaturę pracy gazów, niezbędną do realizacji obiegów termodynamicznych można uzyskać przy pomocy kotła lub pieca opalanego różnymi rodzajami paliw stałych i płynnych w tym także ze źródeł odnawialnych: biomasa, biogaz i inne.

W Polsce w ostatnich latach rozpowszechniło się zastosowanie kotłów na ekologiczne paliwa biomasowe ze źródeł odnawialnych takie jak: ziarno energetyczne (np. owies), zrębki drzewne, pelety z granulatu drzewnego, brykiet drzewny, brykiet ze słomy, a także olej opałowy z roślin oleistych, biogaz, gazy wysypiskowe i inne. Ze względów ekonomicznych i praktycznych tylko część wymienionych paliw może być wykorzystana w budowanych na małą skalę instalacjach dla pojedynczych gospodarstw domowych.

## 10. 5. Podsumowanie

System ozonowania wody zasilany z paneli fotowoltaicznych jest obecnie na etapie przygotowania do prac wdrożeniowych. Jako w pełni autonomiczny, o konstrukcji modułowej, może być łatwo dopasowywany do indywidualnych potrzeb użytkowników. Systemy tego typu mogą stanowić wyposażenie zarówno domów jednorodzinnych, sanatoriów i SPA, jak również znaleźć zastosowanie do oczyszczania wody w krajach słaborozwiniętych, ale o wysokim nasłonecznieniu.

Ogniwa paliwowe wykorzystywane w generatorach CHP stanowią nowe, przyszłościowe źródło ciepła i energii elektrycznej. Zastępują układy wytwarzające energię z surowców kopalnych, systemami wykorzystującymi źródła odnawialne. Ważnym aspektem zastosowania ogniwi paliwowych w systemie grzewczym jest ochrona środowiska. Zastosowanie ogniwi paliwowych pozwala obniżyć emisję szkodliwych substancji do atmosfery.

Grzewcze ogniwo paliwowe wytwarza ciepło w sprzężonym procesie bezpośrednio w budynkach i dlatego może zapewnić produkcję energii w miejscu jej zużycia. Pozwala to zmniejszyć straty powstałe przy przesyłce energii. Obecnie stosowane grzewcze ogniwa paliwowe są jednostkami doświadczalnymi i są ciągle doskonalone. Budowane układy mają żywotność nie mniejszą niż 40000 godzin, co oznacza konieczność wymiany całego bloku co 5-7 lat.

Głównym czynnikiem ograniczającym wzrost zastosowań ogniwi paliwowych w systemach grzewczych są ich duże koszty inwestycyjne.

Rozwiązania „małych elektrociepłowni domowych” wykorzystujących skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepłej cieszą się coraz większym zainteresowaniem na świecie czego dowodem są konstrukcje takich urządzeń opracowywane w Japonii, Stanach Zjednoczonych i w Niemczech. Rosnące ceny energii elektrycznej i ciepła narzucają konieczność stosowania nowych rozwiązań.

Obecnie stosowane rozwiązania zasilania odbiorców indywidualnych w energię elektryczną i ciepło opierają się na wykorzystaniu kosztownej sieci przesyłowej i dystrybucji tych mediów należących do dużych przedsiębiorstw energetycznych. Takie rozwiązania narzucają odbiorcom wysokie ceny energii związane z jej przesyłem i produkcją oraz muszą uwzględniać straty energii związane z odległością odbiorcy indywidualnego od punktu wytwarzania. Wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła w sposób skojarzony bezpośrednio u odbiorcy końcowego eliminuje koszty związane z przesyłem, obniża koszty energii do kosztów jej wytworzenia, zwiększa pewność zasilania i elastyczność użycia oraz umożliwia zastosowanie paliw ze źródeł odnawialnych często występujących w

Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii jest jednym z priorytetowych działań krajów Unii Europejskiej w zakresie ochrony klimatu, bezpieczeństwa energetycznego, czy ochrony środowiska. Ograniczenie emisji szkodliwych substancji (w głównej mierze gazów cieplarnianych), pozytywny wpływ na bezpieczeństwo dostaw energii oraz efektywne użytkowanie energii to czynniki istotne dla rozwoju domowych systemów energetycznych. Oszacowano, że w krajach Europy Zachodniej do 2020 roku udział energii elektrycznej wytwarzanej w skojarzeniu znacznie wzrośnie, natomiast jedna piąta zapotrzebowania energii w Europie będzie wykorzystywana z biomasy [29]. Przyjmując aspekty ekologiczne biomasa jest idealną alternatywą dla gazu, w celu zaopatrzenia budynków użyteczności publicznej w energię.

Wzrastające wymogi ochrony środowiska i wynikający z nich staranny dobór typu źródła energii sprawiają że wzrasta zainteresowanie nowymi technologiami, których zastosowanie na dużą skalę w przedsiębiorstwach energetycznych jest nieuzasadnione ekonomicznie.

Niska sprawność systemów przesyłowych energii cieplnej, wymagania wysokiej jakości energii elektrycznej przez zaawansowane technologie przemysłowe i informatyczne, powodują intensywne poszukiwania bardziej racjonalnych technologii wytwarzania, przesyłania i użytkowania energii elektrycznej i cieplnej. Kogeneracja rozproszona w małych elektrociepłowniach o mocach kilku megawatów obniża straty w dystrybucji ciepła, ale nie rozwiązuje w pełni problemu. Jednym ze sposobów poprawy efektywności wykorzystania ciepła jest idea generowania energii cieplnej i elektrycznej bezpośrednio w mieszkaniu

Układy skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej są technologią atrakcyjną ekonomicznie, która według analiz i badań ma szansę rozwinąć się na większą skalę w niedalekiej przyszłości.

## **10.6. Literatura**

- [1] Stryczewska H. D., Janowski T., Nalewaj K.: „Technologie plazmowe i nadprzewodnictwo” Nowe kierunki wytwarzania i wykorzystania energii: Zrównoważone systemy energetyczne - monografia, 2005, rozdział 6
- [2] Janowski T., Nalewaj K., Stryczewska H. D., Złonkiewicz Z.: „The Application of Solar Energy in the Conditions of Lublin Region ” 4th International Conference: Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection - ELMECO-4, Nałęczów, Poland, September 21-24 2003,
- [3] Stryczewska H. D., Nalewaj K.: „Solar Energy in the Installations of Swimming Pool Water Treatment” International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Nałęczów – Poland, 4 – 7 September 2005, str. 47 - 48
- [4] Nalewaj K., Stryczewska H. D.: „Modelling Results of the Laboratory Photovoltaic System” International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO 5, Nałęczów – Poland, 4 – 7 September 2005, str. 49
- [5] Stryczewska H. D., Janowski T.: „Installation of Swimming Pools Water Treatment with Ozone Powered Photovoltaic Panels” 9th International Conference: High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistr, Padova, Italy, August 23-34, 2004,
- [6] Stryczewska H. D., Nalewaj K., Janowski T.: „Stand alone PV system to supply swimming pool water treatment installation” 14. Intern. Sonnenforum, Freiburg, Germany, 2004, 350-356
- [7] Stryczewska H. D.: Wykorzystanie energii słonecznej w technologiach inżynierii ochrony środowiska” Seminarium IPPT Wybrane zagadnienia w tematyce budownictwa niskoenergetycznego, Warszawa, 09-12-2004,
- [8] Stryczewska H. D., Nalewaj K.: „Energia słoneczna w ozonowaniu wody basenowej” Sport Plus, Nr 1, lipiec 2005 r., str. 80 – 83
- [9] Bujło P.: Polimerowe, superjonowe membrany dla ogniw paliwowych typu PEMFC – rozprawa doktorska, Wrocław, 2006

- [10] Fuel Cell Handbook 7, by EG&G Technical Services, Inc. U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, P.O. Box 880 Morgantown, West Virginia 26507-0880, November 2004
- [11] Skorek J., Kalina J.: Gazowe układy kogeneracyjne. WNT 2005
- [12] Materiały firmy Vaillant, Planning Information-Fuel Cell Heating Appliance, 2003
- [13] Bugyi R., Drążkiewicz J.: Nadzór rozproszonych systemów zasilania opartych na alternatywnych źródłach energii, APS Energia sp. z o.o., Warszawa, 1999
- [14] Appleby J.: Elektrochemiczne silniki samochodowe, tłum. M. Ramotowski, Świat Nauki, wrzesień 1999
- [15] Energia XXII - Ciepło, Elektroenergetyka, Gaz, Dodatek reklamowy do Rzeczpospolitej nr 86 (5556), 11 kwietnia 2000
- [16] Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, <http://www.imiue.polsl.pl/dane/mylinks/ogniwa/>
- [17] Viessmann, zeszyty fachowe: Technika grzewcza dla nowego budownictwa, [http://www.viessmann.pl/etc/medialib/internet-pl/pdf\\_documents](http://www.viessmann.pl/etc/medialib/internet-pl/pdf_documents)
- [18] Urządzenia Dla Energetyki, <http://urzedzeniadlaenergetyki.pl>
- [19] Micro Combined Heat & Power, [http://www.microchap.info/fuel\\_cell.htm](http://www.microchap.info/fuel_cell.htm)
- [20] Panasonic Household Fuel Cell Cogeneration System, April 2008, <http://panasonic.co.jp/corp/news>
- [21] Plug Power, Smart Energy for a blue planet, <http://www.plugpower.com/userfiles>
- [22] Acumentrics, Trusted Power Innovations, <http://www.acumentrics.com/>
- [23] Ceramic Fuel Cells Limited, Modular Generator-Power + Heat, <http://www.cfcl.com.au>
- [24] Hexis, Galileo-decentralised energy and heat supply with fuel cells, <http://www.hexis.com>
- [25] Research Institute for Sustainable Energy, <http://www.rise.org.au/info>
- [26] Industry Service, <http://www.netinform>
- [27] Chmielniak T.: Technologie energetyczne, WNT, Warszawa, 2008.
- [28] Podziemska A.: Technologiczno-ekonomiczne aspekty gazowej gospodarki skojarzonej cz.1, Nowoczesne Gazownictwo – nr 4/2005.
- [29] Połacki Z.: „Możliwości wykorzystania organicznego obiegu Rankine’a dla odzysku ciepła z procesów technologicznych. Rynek Energii, str. 50, Nr 2 (75) – 2008.
- [30] Simader G.R., Krawinkler R., Trnka G. : Micro CHP systems: state of the art, Vienna, 2006.
- [31] Skorek J., Kalina J.: Gazowe układy kogeneracyjne, WNT, Warszawa, 2005.
- [32] Smit R.: Cogeneration, Distributed Generation and Renewables, KEMA Nederland BV, 2006.
- [33] Materiały promocyjne firmy Baxi Group., [www.baxi.co.uk](http://www.baxi.co.uk).
- [34] Materiały promocyjne firmy WhisperGen Ltd., [www.whispergen.com](http://www.whispergen.com)
- [35] Materiały szkoleniowe firmy RetScreen International, [www.etscreen.net](http://www.etscreen.net)