

# Spis treści

|                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>OD AUTORA</b>                                                                                                         | <b>15</b> |
| <b>1. WPROWADZENIE</b>                                                                                                   | <b>17</b> |
| 1.1. Źródła i przetwarzanie energii                                                                                      | 19        |
| 1.1.1. Bilans energetyczny zewnętrzny Ziemi - nasłonecznienie                                                            | 20        |
| 1.1.2. Bilans energetyczny wewnątrz gazowo-parowej otoczki Ziemi                                                         | 22        |
| 1.1.3. Potrzebne postacie energii i ich wytwarzanie, retrospekcja i perspektywy                                          | 24        |
| 1.1.4. Zużycie energii                                                                                                   | 28        |
| 1.1.5. Infrastruktura energetyczna Polski                                                                                | 31        |
| 1.1.6. Produkcja energii elektrycznej i produkt krajowy brutto                                                           | 31        |
| 1.1.7. Energia promienista Słońca, flogiston i gęstość jego masy                                                         | 33        |
| 1.2. Fluidalne maszyny przetwarzające energię                                                                            | 36        |
| 1.2.1. Maszyny fluidalne                                                                                                 | 36        |
| 1.2.2. Fluid jako nośnik energii i elementy przekazujące energię                                                         | 39        |
| 1.2.3. Maszyny przepływowe i objętościowe, obieg cieplny, obwód przepływu                                                | 41        |
| 1.3. Przekazywanie i przetwarzanie energii fluidu                                                                        | 46        |
| 1.4. Systematyka prostych maszyn fluidalnych                                                                             | 51        |
| 1.4.1. Kryteria różnicujące energetyczne maszyny fluidalne działające mechanicznie                                       | 51        |
| 1.4.2. Łopatkowe maszyny przepływowe                                                                                     | 53        |
| 1.4.3. Strumieniowe maszyny przepływowe                                                                                  | 56        |
| 1.5. Początki technicznej realizacji maszyn fluidalnych i systemów energetycznych                                        | 62        |
| <b>2. KINETYKA I TERMODYNAMIKA PRZEPLÝWU I PRZEKAZYWANIA ENERGII PRZY JEDNOWYMIAROWYM OPISIE STANU STRUGI</b>            | <b>68</b> |
| 2.1. Modelowanie termodynamiczne stanu płynu i uogólnione pojęcia drogi, siły, entropii i entalpii                       | 68        |
| 2.1.1. Stan termiczny i równanie stanu termicznego gazów rzeczywistych                                                   | 69        |
| 2.1.2. Stan kaloryczny - energia wewnętrzna i entalpia właściwa                                                          | 71        |
| 2.1.3. Entropia właściwa, wykresy, degradacja, dysypacja energii                                                         | 74        |
| 2.1.3.1. Wykres mechaniczny pracy F-x                                                                                    | 74        |
| 2.1.3.2. Wykres termiczny pracy p-v                                                                                      | 74        |
| 2.1.3.3. Wykres kaloryczny T-s                                                                                           | 75        |
| 2.1.4. Wykresy entropowe, idealizacja gazów rzeczywistych: gazy doskonałe                                                | 77        |
| 2.1.4.1. Gaz termicznie i gaz kalorycznie doskonały                                                                      | 78        |
| 2.1.4.2. Wykres temperatura-entropia (T, s) gazu rzeczywistego dla zakresu technicznego i rozszerzonego do 0 K           | 78        |
| 2.1.4.3. Wykres T-s gazu rzeczywistego i skutki jego idealizacji w określonym obszarze                                   | 80        |
| 2.1.4.4. Wykres T-s z logarytmiczną skalą temperatury dla gazu kalorycznie doskonałego i porównanie z gazem rzeczywistym | 82        |
| 2.1.4.5. Wykresy entropowe rzeczywistych czynników: temperaturowe                                                        |           |

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| (T, s) i entalpie (h, s)                                                                                                                          | 85  |
| 2.1.5. Entalpia właściwa normalna                                                                                                                 | 86  |
| 2.1.6. Wykres entalpia-entropia i uogólnione pojęcie entalpii                                                                                     | 89  |
| 2.1.6.1. Entalpia uogólniona statyczna i całkowita - uogólnienie teorii maszyn przepływowych                                                      | 92  |
| 2.1.6.2. Ciepne i hydrauliczne maszyny przepływowe w procesach adiabatywnych i diabatycznych                                                      | 93  |
| 2.2. Modelowanie kinetyczne i termodynamiczne strugi rzeczywistej                                                                                 | 94  |
| 2.2.1. Modelowanie jedno-, dwu- i trójwymiarowe rzeczywistej strugi głównej przepływu i przekazywania energii przez wieńce                        | 94  |
| 2.2.2. Uśrednianie parametrów kinetycznych i termodynamicznych strugi płynącej przez kanały i wieńce dla potrzeb modelu 1D                        | 95  |
| 2.2.3. Granice stosowania modeli 1D                                                                                                               | 99  |
| 2.2.4. Modelowanie 2D i 3D stanu strugi                                                                                                           | 99  |
| 2.2.5. Modelowanie zewnętrznego opływu powierzchni                                                                                                | 100 |
| 2.3. Modelowanie 1D przekazywania energii w wirnikowej maszynie przepływowej                                                                      | 101 |
| 2.3.1. Jednostopniowa przepływowa łopatkowa maszyna diagonalna o odwracalnym kierunku przekazywania energii płynowi                               | 101 |
| 2.3.2. Przekazywanie energii płynowi w kompletnym uogólnionym stopniu maszyny wirnikowej, problemy kinetyczne. Równanie Eulera maszyn wirnikowych | 107 |
| 2.3.3. Podstawowe wskaźniki kinetyczne przepływu i przekazywania energii w stopniu                                                                | 112 |
| 2.3.3.1. Udziały kinetyczne R                                                                                                                     | 113 |
| 2.3.3.2. Wskaźniki: przelotności $j$ napędu $Y_u$                                                                                                 | 114 |
| 2.3.3.3. Sprawność kinetyczna napędu                                                                                                              | 115 |
| 2.3.4. Przekazywanie energii płynowi ściśliwemu, problemy termodynamiczne                                                                         | 118 |
| 2.3.4.1. Straty w przepływie i sprawność przepływu adiabatywnego $h_k$ , przykład sprężarki i turbiny                                             | 118 |
| 2.3.4.2. Obliczenia projektowe oparte na udziałach kinetycznych R                                                                                 | 124 |
| 2.3.4.3. Udziały termodynamiczne $\theta$ i obliczenia projektowe na nich oparte                                                                  | 125 |
| 2.3.4.4. Sprawność wewnętrzna i uwagi podsumowujące                                                                                               | 130 |
| 2.3.5. Obliczanie wysokości łopatek w wieńcach - płyn ściśliwy                                                                                    | 132 |
| 2.3.6. Wpływ zmiany kinetyki i udziału wirnika w rozpatrywanej maszynie wg p. 2.3.1                                                               | 135 |
| 2.3.7. Odchylenie strugi przy przepływie przez palisadę i wieniec łopatek                                                                         | 139 |
| 2.4. Przykłady typowych ułatkowań jedno- i wielostopniowych wirnikowych maszyn przepływowych                                                      | 143 |
| 2.4.1. Problemy przepływowe i konstrukcyjne wielostopniowych maszyn osiowych i diagonalnych o zwartym układzie łopatkowym, przykłady              | 143 |
| 2.4.2. Osiowe turbiny i sprężarki, kinetyka i termodynamika                                                                                       | 155 |
| 2.4.2.1. Stopień pośredni turbin osiowych                                                                                                         | 155 |
| 2.4.2.2. Stopień pośredni osiowej sprężarki wielostopniowej qysokoobciążonej i sprężarka jednostopniowa                                           | 157 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.4.3. Problemy uśredniania prędkości przepływu przy stosowaniu modelu 1D w maszynach przepływowych                                            | 158 |
| 2.5. Systematyka i optymalizacja wirnikowych maszyn przepływowych                                                                              | 161 |
| 2.5.1. Zredukowane wykresy pędu właściwego (prędkości), wyróżniki                                                                              | 161 |
| 2.5.2. Systematyka kinetyczna stopni osiowych                                                                                                  | 163 |
| 2.5.3. Wskaźnik obciążenia ułopatkowania maszyny i zmodyfikowana liczba Parsonsa                                                               | 165 |
| 2.5.4. Uogólniony wyróżnik s umożliwiający uszeregowanie optymalnych ukształtowań stopni i maszyn wirnikowych                                  | 166 |
| 2.5.5. Wyróżnik s dla wielostopniowych lub wielostrumieniowych maszyn wirnikowych przy przepływie płynu, którego ściśliwość może być pominięta | 171 |
| 2.5.6. Optymalizacja maszyn jedno- i wielostopniowych, gdy konstruktor ma swobodę doboru częstości obrotów n                                   | 172 |
| 2.5.7. Maszyny najwyższej sprawności o stopniach zintegrowanych przekładnią                                                                    | 173 |
| 2.6. Maszyny strumieniowe, kinetyka przepływu i przekazywania energii płynowi                                                                  | 175 |
| 2.6.1. Maszyna strumieniowa - równanie strumienia pędu i strumienia impulsu płynu                                                              | 175 |
| 2.6.2. Przykład pędnika strumieniowego adiabatycznego                                                                                          | 178 |
| 2.6.3. Pędnik strumieniowy przy opisie 1D strugi i dalszych założeniach upraszczających                                                        | 181 |
| 2.7. Modelowanie skutków dysypacji i degradacji oraz kryteria podobieństwa w przepływach                                                       | 183 |
| 2.7.1. Modelowanie skutków dysypacji sprawnością przepływu $r _k$                                                                              | 183 |
| 2.7.2. Modelowanie skutków dysypacji wykładnikiem politropy m                                                                                  | 187 |
| 2.7.3. Modelowanie stałej gęstości przepływu w przemianie Adiabatycznej (linie Fanno) i nieadiabatycznej                                       | 188 |
| 2.7.3.1. Przepływ adiabatyczny przez kanał o stałej powierzchni przekroju, np. rurę                                                            | 188 |
| 2.7.3.2. Przepływ nieadiabatyczny przez kanał o stałej powierzchni przekroju 190                                                               |     |
| 2.7.4. Równanie przepływu politropowego (de Saint Venanta) i wymiarowanie kanału                                                               | 190 |
| 2.7.5. Prędkości oraz wskaźniki kryterialne stanu czynnika lotnego                                                                             | 191 |
| 2.7.6. Podobieństwo i wskaźniki kryterialne przepływu                                                                                          | 193 |
| 2.8. Przepływ i przekazywanie energii w zmienionych warunkach                                                                                  | 196 |
| 2.8.1. Praca wieńców w zmienionych warunkach napływu                                                                                           | 196 |
| 2.8.1.1. Wieńce konfuzorowe w zmienionych warunkach                                                                                            | 198 |
| 2.8.1.2. Wieńce dyfuzorowe w zmienionych warunkach                                                                                             | 200 |
| 2.8.2. Zmiana czynnika roboczego                                                                                                               | 201 |
| 2.8.2.1. Zmiana gęstości płynu                                                                                                                 | 201 |
| 2.8.2.2. Przepływ fluidu dwufazowego - zawiesin i mieszanin                                                                                    | 202 |
| 2.8.3. Zmiana prędkości unoszenia (częstości obrotów)                                                                                          | 203 |
| 2.8.4. Szacowanie strumienia masy m przy zmianie temperatury i ciśnienia początkowego lub zmianie ciśnienia końcowego                          | 203 |
| 2.8.4.1. Aproksymacja Bendemana równania politropowego przepływu czynnika ściśliwego przez pojedynczy kanał                                    | 203 |
| 2.8.4.2. Aproksymacja przepływu czynnika ściśliwego przez szereg przewężeń                                                                     | 206 |
| 2.8.4.3. Przepływ czynnika nieściśliwego przez kanał                                                                                           | 207 |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.9. Egzergia, straty egzergii w przemianach i procesach                                                                             | 208 |
| 2.9.1. Energia przetwarzalna w każdą jej postać                                                                                      | 208 |
| 2.9.2. Straty egzergii w przepływie izoenergetycznym w wyniku dysypacji                                                              | 210 |
| 2.9.3. Straty egzergii w wyniku mieszania                                                                                            | 210 |
| 2.9.3.1. Mieszanie strugi z otoczeniem                                                                                               | 210 |
| 2.9.3.2. Mieszanie powietrza lub pary wodnej i gazów spalinowych, np. spalanie przy nadmiarze powietrza lub przy wtrysku pary wodnej | 213 |
| 2.9.4. Strata egzergii w wyniku degradacji                                                                                           | 213 |
| 2.9.4.1. Przenikanie ciepła przez przegrodę                                                                                          | 213 |

### **3. MASZyny PRZEPLYWOWE PRACUJĄCE PŁYNEM NIEŚCIŚLIWYM - PRZYKŁADY I PROBLEMY**

**215**

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Turbiny wodne                                                                                                                      | 215 |
| 3.1.1. Źródło energii - obieg termodynamiczny turbin wodnych                                                                            | 215 |
| 3.1.2. Turbina wodna                                                                                                                    | 220 |
| 3.1.2.1. Kinetyka przepływu i przekazywania energii                                                                                     | 220 |
| 3.1.3. Turbiny promieniowo-osiowe, wirniki quasi-diagonalne - od turbiny Fourneyrona do Francisa                                        | 223 |
| 3.1.4. Turbiny wodne z osiowym wieńcem wirującym - Kaplana (promieniowo-osiowe), turbiny osiowe rurowe i o zwartej zabudowie kompaktowe | 229 |
| 3.2. Turbiny wiatrowe - wiatraki                                                                                                        | 237 |
| 3.2.1. Źródła energii wiatru i jej przetwarzanie                                                                                        | 237 |
| 3.2.2. Kinetyka przepływu i przykłady rozwiązań konstrukcyjnych silników wiatrowych                                                     | 241 |
| 3.2.3. Lokalizacja zespołów wielosilnikowych, problemy konstrukcyjne i ekologiczne                                                      | 245 |
| 3.2.4. Turbiny śmigłowe powietrzne wiatrowe i wodne przyływowe                                                                          | 249 |
| 3.3. Pompy cieczy, dmuchawy                                                                                                             | 250 |
| 3.3.1. Pompy cieczy i dmuchawy, podobieństwa i różnice                                                                                  | 250 |
| 3.3.2. Przykłady pomp i dmuchaw promieniowych                                                                                           | 256 |
| 3.3.3. Charakterystyka pracy i granica stabilnej pracy pomp i dmuchaw promieniowych                                                     | 259 |
| 3.3.3.1. Charakterystyka pracy pompy i dmuchawy                                                                                         | 259 |
| 3.3.3.2. Współpraca pompy z odbiornikiem, granica stateczności, pompowanie                                                              | 263 |
| 3.3.4. Wentylatory i pompy osiowe                                                                                                       | 267 |
| 3.4. Sprzęgła, przekładnie i hamulce przepływowe                                                                                        | 268 |
| 3.4.1. Sprzęgła przepływowe (kinetyczne)                                                                                                | 268 |
| 3.4.2. Przekładnie przepływowe                                                                                                          | 277 |
| 3.4.3. Hamulce przepływowe                                                                                                              | 279 |
| 3.5. Przepływowe maszyny strumieniowe adiabatyczne                                                                                      | 281 |
| 3.5.1. Maszyny strumieniowe liniowe adiabatyczne                                                                                        | 281 |
| 3.5.2. Strumieniowe maszyny wirnikowe                                                                                                   | 285 |
| 3.5.2.1. Zasada działania strumieniowej maszyny wirnikowej i jej pierwsze konstrukcje                                                   | 285 |
| 3.5.2.2. Turbina Peltona                                                                                                                | 287 |
| 3.5.3. Strumienice                                                                                                                      | 294 |
| 3.5.4. Strumieniowe maszyny przetwórcze                                                                                                 | 296 |

|                                                                                                                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4. ORGANIZACJA PRZEPŁYWU I PRZEKAZYWANIA ENERGII<br/>W CIEPLNYCH MASZYNACH PRZEPŁYWOWYCH</b>                                                                          | <b>298</b> |
| 4.1. Modelowanie i ocena porównawcza przepływu głównego<br>i przetwarzania energii w wirnikowych cieplnych maszynach<br>przepływowych jedno- i wielostopniowych          | 298        |
| 4.1.1. Typowe organizacje przepływu i rozwiązania konstrukcyjne wirnikowych maszyn<br>przepływowych osiowych                                                             | 299        |
| 4.1.2. Ocena porównawcza tradycyjnych turbinowych stopni tarczowych „akcyjnych” o<br>$R_w = 0$ i bębnowych „reakcyjnych” o $R_w = 0,5$ przy opisie<br>1D stanu strugi    | 301        |
| 4.1.3. Dobór optymalnego udziału wirnika w stopniach osiowych                                                                                                            | 304        |
| 4.1.3.1. Koncepcja przeprowadzenia porównania stopni o różnym udziale wirnika                                                                                            | 304        |
| 4.1.3.2. Wpływ udziału kinetycznego wirnika $R_w$ sprawności przepływu wskaźnika przelotności $j$<br>na sprawność napędu $\eta_u$ stopnia i grupy stopni turbiny osiowej | 307        |
| 4.1.3.3. Niektóre wnioski z przeprowadzonych porównań                                                                                                                    | 313        |
| 4.2. Organizacja przepływu w celu intensyfikacji przekazywania mocy<br>w cieplnych maszynach przepływowych                                                               | 314        |
| 4.2.1. Graniczne obciążenie stopni                                                                                                                                       | 314        |
| 4.2.1.1. Ograniczenia prędkości obwodowej                                                                                                                                | 315        |
| 4.2.1.2. Zwiększenie wskaźnika napędu w stopniach turbiny o $R_w = 0$ , zdwojenie stopnia                                                                                | 315        |
| 4.2.2. Zdwojone stopnie                                                                                                                                                  | 320        |
| 4.2.2.1. Stopień Curtisa                                                                                                                                                 | 320        |
| 4.2.2.2. Stopnie zdwojone z pojedynczym wieńcem wirującym, przykład turbiny Electra i<br>Schichau                                                                        | 323        |
| 4.2.2.3. Dmuchawy poprzeczne                                                                                                                                             | 324        |
| 4.2.2.4. Samowentylujące wymienniki ciepła                                                                                                                               | 324        |
| 4.2.3. Stopnie z naddźwiękowym wieńcem wirującym                                                                                                                         | 326        |
| 4.2.4. Turbiny, sprężarki, pompy małych mocy i ich zespoły zintegrowane<br>z przekładnią                                                                                 | 327        |
| 4.2.4.1. Zintegrowany przekładnią napęd turbiną parową dwustopniową<br>MFO                                                                                               | 327        |
| 4.2.4.2. Zintegrowane z przekładnią turbiny parowe KKK i GEC Alsthom                                                                                                     | 329        |
| 4.2.5. Maszyny z przeciwbieżnymi wirnikami                                                                                                                               | 333        |
| 4.2.5.1. Turbiny parowe dwuwirnikowe promieniowe STAL<br>- Huta Stalowa Wola                                                                                             | 333        |
| 4.2.5.2. Dwuwirnikowe dmuchawy i pędniki przeciwbieżne osiowe                                                                                                            | 336        |
| 4.2.5.3. Dwuwirnikowe wielostopniowe osiowe maszyny przeciwbieżne                                                                                                        | 337        |
| 4.2.6. Sprężarki promieniowe CMP - Huta Stalowa Wola                                                                                                                     | 337        |
| 4.3. Moc graniczna i przystosowywanie turbin i sprężarek do pracy<br>w zmienionych warunkach, regulacja mocy, rozrząd                                                    | 342        |
| 4.3.1. Dwustrumieniowe jednokadłubowe o przeciwbieżnym przepływie<br>maszyny promieniowo-osiowe i osiowo-promieniowe, podwyższenie<br>mocy granicznej turbin parowych    | 342        |
| 4.3.2. Rozdwojenie równoległe promieniowe strumienia wylotowego<br>dla stałego zwiększenia mocy turbin osiowych - koncepcja Baumanna                                     | 347        |
| 4.3.3. Regulacja mocy turbin parowych                                                                                                                                    | 349        |
| 4.3.3.1. Poszukiwanie optymalnego rozrządu pary                                                                                                                          | 350        |
| 4.3.3.2. Rozrząd klasyczny kolejno otwieranymi zaworami                                                                                                                  |            |

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| w jednostopniowej turbinie przeciwprężnej                                                                                                    | 351 |
| 4.3.3.3. Wpływ otwierania następnego zaworu i konieczność nakładania zamykania i otwierania kolejnych zaworów                                | 352 |
| 4.3.3.4. Przykład dwuzaworowego rozrządu w wielostopniowej turbinie kondensacyjnej uzupełnionego trzecim obejściowym zaworem przeciążeniowym | 354 |
| 4.3.3.5. Przykład trójzaworowego rozrządu w turbinie przeciwprężnej                                                                          | 357 |
| 4.3.4. Zwiłokrotnianie równoległych strumieni dla okresowego zwiększania i zmniejszania strumienia masy, rozrząd wg koncepcji J. Karrera     | 359 |
| 4.3.4.1. Przeciężeniowy rozrząd z obejściem wlotowej grupy stopni (przypadek A)                                                              | 362 |
| 4.3.4.2. Przeciężeniowy rozrząd z obejściem do ostatniego stopnia grupy wlotowej (przypadek B)                                               | 362 |
| 4.3.4.3. Przeciężeniowy rozrząd z obejściem drugiego stopnia w grupie wlotowej (przypadek C)                                                 | 363 |
| 4.3.4.4. Przeciężeniowy rozrząd z dwoma obejściami w grupie wlotowej (przypadek D)                                                           | 363 |
| 4.3.5. Turbiny i sprężarki zasilane z wielu źródeł o różnych parametrach lub zasilające urządzenia o różnych ciśnieniach                     | 365 |
| 4.4. Przepływy uboczne i przekazywanie energii poza wieńcami łopatkowymi w przepływowych maszynach wirnikowych                               | 366 |
| 4.4.1. Uszczelnienia części wirujących                                                                                                       | 366 |
| 4.4.1.1. Uszczelnienia bezdotykowe dławiące labiryntowe                                                                                      | 367 |
| 4.4.1.2. Uszczelnienia bezdotykowe dynamiczne                                                                                                | 369 |
| 4.4.1.3. Uszczelnienia ślizgowe                                                                                                              | 370 |
| 4.4.1.4. Uszczelnienia z płynem zamykającym                                                                                                  | 371 |
| 4.4.2. Modelowanie przepływu przez uszczelnienia labiryntowe                                                                                 | 373 |
| 4.4.2.1. Przepływ przez szereg jednakowych otworów                                                                                           | 374 |
| 4.4.2.2. Przepływ przez szereg niejednakowych otworów                                                                                        | 374 |
| 4.4.2.3. Oszacowanie przepływu masy przez uszczelnienie labiryntowe                                                                          | 376 |
| 4.4.3. Projektowanie i eksploataowanie uszczelnień labiryntowych                                                                             | 382 |
| 4.4.3.1. Ocena ekonomiczna uszczelnień                                                                                                       | 382 |
| 4.4.3.2. Określanie wielkości szczelin labiryntowych                                                                                         | 383 |
| 4.4.3.3. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych uszczelnień labiryntowych                                                                       | 385 |
| 4.4.3.4. Przepływy nieustalone przez uszczelnienia labiryntowe                                                                               | 387 |
| 4.4.4. Straty brodzenia tarcz i bębnow, siły poprzeczne do przepływu na nie działające                                                       | 389 |
| 4.4.4.1. Brodzenie tarcz i bębnow                                                                                                            | 390 |
| 4.4.4.2. Brodzenie wieńców                                                                                                                   | 390 |
| 4.4.4.3. Brodzenie tarcz i bębnow z otworami                                                                                                 | 391 |
| 4.4.4.4. Siły poprzeczne do przepływu działające na wirujące bębny i tarcze                                                                  | 392 |
| 4.4.4.5. Opływ walca                                                                                                                         | 393 |
| 4.4.4.6. Opływ ściętego stożka                                                                                                               | 394 |
| 4.4.4.7. Opływ tarczy                                                                                                                        | 395 |
| 4.5. Praca maszyny wirnikowej z uwzględnieniem przecieku przy opisie 1D strugi głównej i ubocznej                                            | 396 |
| 4.5.1. Model energetyczno-przepływowy 1D maszyny z przepływem ubocznym i stratami brodzenia                                                  | 396 |
| 4.5.1.1. Przykład jednostopniowej diagonalnej sprężarki i turbiny                                                                            | 396 |

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.1.2. Model energetyczno-przepływowy wielostopniowej maszyny<br>- przykład turbiny parowej                                   | 398 |
| 4.5.2. Modelowanie 1D pracy stopnia z przepływami ubocznymi<br>w zmienionych warunkach                                          | 400 |
| 4.5.2.1. Zasady postępowania                                                                                                    | 401 |
| 4.5.2.2. Przykład obliczania charakterystyk stopnia akcyjnego osiowej turbiny systemu<br>komorowego przy zmianie warunków pracy | 403 |
| 4.5.3. Zastosowanie modelu 1D do sprężarki promieniowej i turbiny<br>parowej osiowej i jego niedoskonałości                     | 406 |
| 4.6. Projektowanie układu przepływowego maszyn na podstawie<br>modelu 1D strugi                                                 | 408 |
| 4.6.1. Przykłady projektowania układu przepływowego przemysłowej<br>turbiny parowej przeciwprężnej                              | 408 |
| 4.6.1.1. Przyjęcie ogólnej koncepcji układu i schematu przepływu                                                                | 409 |
| 4.6.1.2. Obliczenia 1D dla grupy E-M stopni                                                                                     | 410 |
| 4.6.2. Obliczanie stopnia osiowego                                                                                              | 412 |
| 4.6.2.1. Tok obliczeń energetyczno-przepływowych stopnia                                                                        | 412 |
| 4.6.2.2. Dobór optymalnego wypełnienia wieńca                                                                                   | 413 |
| 4.6.2.3. Tablice wzorcowe stopnia                                                                                               | 415 |
| 4.6.2.4. Uzupełnienie tablic wzorcowych stopnia                                                                                 | 416 |
| 4.6.2.5. Obliczanie przepływowe stopnia                                                                                         | 418 |

## **5. PRZEPLĄWY WTÓRNE I UBOCZNE, ICH GENEROWANIE, MODELOWANIE I INTERAKCJE Z PRZEPLĄWEM GŁÓWNYM 3D**

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Równowaga promieniowa w przepływie, zjawiska towarzyszące                                                             | 421 |
| 5.1.1. Równowaga promieniowa w przepływie z krętem między powierzchniami<br>obrotowymi                                     | 421 |
| 5.1.2. Równowaga promieniowa w uproszczonych przypadkach                                                                   | 425 |
| 5.1.3. Praca stopnia z wysokimi łopatkami                                                                                  | 425 |
| 5.1.3.1. Przepływ nieściśliwy                                                                                              | 425 |
| 5.1.3.2. Przepływ ściśliwy                                                                                                 | 427 |
| 5.1.3.3. Przewidywanie zmian w pracy stopnia                                                                               | 429 |
| 5.1.4. Projektowanie stopnia - model 2Dr (warstwowy)                                                                       | 429 |
| 5.2. Przepływy wtórne w przepływie głównym przez wieńce i stopnie,<br>ich modelowanie oraz generowanie i systematyka strat | 433 |
| 5.2.1. Wir podkowiasty                                                                                                     | 434 |
| 5.2.2. Para wirów kanałowych                                                                                               | 435 |
| 5.2.3. Interakcja wirów kanałowych i podkowiastych                                                                         | 437 |
| 5.2.4. Wir generowany przez przeciek nadłopatkowy                                                                          | 437 |
| 5.2.5. Wir bezwładnościowy w wieńcu wirującym                                                                              | 437 |
| 5.2.6. Generowanie i systematyka strat w ustalonym przepływie<br>przez palisady, wieńce i stopnie                          | 440 |
| 5.2.7. Przepływ nieustalony przez stopnie i wieńce oraz generowanie<br>strat                                               | 451 |
| 5.2.7.1. Niestacjonarność współpracy wieńców kierownicy oraz wirnika<br>i generowanie strat                                | 451 |
| 5.2.7.2. Stopnie o częściowym zasilaniu                                                                                    | 454 |
| 5.3. Kształtowanie i optyimizowanie profili i wieńców łopatek                                                              | 455 |
| 5.3.1. Optyimizacja profili i podziałki w klasycznych wieńcach łopatek                                                     |     |

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| z uwzględnieniem pracy w zmieniających się warunkach                                                                                     | 455 |
| 5.3.2. Kształtowanie łopatek i wieńców w turbinach parowych                                                                              | 458 |
| 5.3.2.1. Wpływ równowagi promieniowej i indukowanych przepływów wtórnych                                                                 | 458 |
| 5.3.2.2. Doskonalenie wieńców stopni turbinowych nakładaniem wymuszanego promieniowo gradientu ciśnienia                                 | 459 |
| 5.3.2.3. Oddziaływanie kształtem obrzeży                                                                                                 | 460 |
| 5.3.2.4. Oddziaływanie pochyleniem prostych łopatek o stałym kształcie profilu oraz wygięciem osi łopatek                                | 461 |
| 5.3.2.5. Oddziaływanie zewnętrzne wpływające na zmianę warunków brzegowych między wieńcem statora i wirnika lub za wirnikiem             | 462 |
| 5.3.2.6. Szczególne problemy kształtowania stopni o długich łopatkach                                                                    | 463 |
| 5.4. Przepływy uboczne i ich interakcje z przepływem głównym                                                                             | 470 |
| 5.4.1. Geneza problemu                                                                                                                   | 471 |
| 5.4.2. Modelowanie przepływu przez stopnie z uwzględnieniem przepływów i strat ubocznych w ujęciu trójstrefowym                          | 473 |
| 5.4.2.1 Model przepływu trój strefowego obejmujący przepływy i straty uboczne                                                            | 475 |
| 5.4.2.2 Koncepcja weryfikacji modelu trój strefowego na drodze eksperymentalnej                                                          | 478 |
| 5.4.3. Stanowisko badawcze i przedmioty badań                                                                                            | 478 |
| 5.4.3.1. Turbina modelowa IMP TM1                                                                                                        | 478 |
| 5.4.3.2. Zakres badań doświadczalnych na TM1-2 i -3                                                                                      | 480 |
| 5.4.3.3. Interakcje przepływów ubocznych i przepływu głównego przez wieńce                                                               | 481 |
| 5.4.4. Wybrane wyniki badań rozpoznawczych teoretycznych i doświadczalnych                                                               | 482 |
| 5.4.4.1. Sprawdzanie hipotezy dotyczącej strefowego oddziaływania przepływów ubocznych na przepływ główny - badania na turbinie IMP TM1  | 483 |
| 5.4.4.2. Badania wpływu zwiększenia przecieku pod kierownicą i pracy uszczelnień labiryntowych                                           | 489 |
| 5.4.4.3. Badania wpływu profilowania obrzeży                                                                                             | 492 |
| 5.4.4.4. Badania rozpoznawcze pracy otworów odciążających                                                                                | 493 |
| 5.4.4.5. Badania porównawcze na TM1-3 drugiego stopnia z otworami odciążającymi i bez otworów                                            | 498 |
| 5.5. Udział organizacji przepływów ubocznych w doskonaleniu maszyn przepływowych                                                         | 501 |
| 5.5.1. Straty i korzyści wynikające z interakcji przepływów ubocznych i głównego                                                         | 501 |
| 5.5.1.1. Napływ na wieńiec wirujący i interakcje mające wpływ na sprawność                                                               | 501 |
| 5.5.1.2. Dysypacja, degradacja i wewnętrzna rekuperacja                                                                                  | 506 |
| 5.5.1.3. Przepływ uboczny wynikający z przecieku nadbandażowego                                                                          | 507 |
| 5.5.1.4. Przepływ uboczny wynikający z przecieku labiryntowego kierownicy                                                                | 509 |
| 5.5.2. Wyniki badań innych turbin i stopni                                                                                               | 512 |
| 5.5.3. Konstrukcyjne wymuszanie korzystnych interakcji przepływu głównego i przepływów ubocznych wewnętrznych i zewnętrznie inicjowanych | 513 |
| 5.5.3.1. Stopień Baumanna                                                                                                                | 514 |



|                                                                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.3.2. Koncepcja stopni turbiny z optymalnym wykorzystaniem oddziaływania przepływów ubocznych                                   | 516        |
| 5.5.3.3. Turbiny parowe z upustami nieregulowanymi                                                                                 | 519        |
| 5.5.3.4. Turbiny parowe z upustami regulowanymi                                                                                    | 520        |
| 5.5.3.5. Doprowadzenie czynnika roboczego z zewnątrz - turbiny parowe niskoprężne                                                  | 520        |
| 5.5.3.6. Doprowadzenie czynnika chłodzącego                                                                                        | 522        |
| 5.6. Refleksje podsumowujące i uzupełniające                                                                                       | 523        |
| <b>6. TURBINY CIEPLNE PRZEŁOMU WIEKÓW</b>                                                                                          | <b>525</b> |
| 6.1. Narodziny współczesnego skraplacza z „gotyckimi” pękami rur                                                                   | 527        |
| 6.2. Turbozespoły parowe w elektrowniach dużych mocy                                                                               | 534        |
| 6.2.1. Turboblok parowy ABB 933 MW w Lippendorf                                                                                    | 535        |
| 6.2.2. Turboblok parowy Siemens 907 MW Boxberg                                                                                     | 545        |
| 6.2.3. Turboblok parowy Siemens 1600 MW planowany dla siłowni jądrowej Olkiluoto w Finlandii (uruchomienie przewidziane w 2009 r.) | 549        |
| 6.2.4. Turboblok dwuwałowy MHI                                                                                                     | 553        |
| 6.3. Turbozespoły dużych mocy w skojarzonej gospodarce energetycznej (elektrociepłownie)                                           | 553        |
| 6.3.1. Turbozespół CEC Alsthom w EC Skaerbaek                                                                                      | 554        |
| 6.3.2. Turbozespół Ansaldo w EC Avedore 2                                                                                          | 556        |
| 6.4. Turbozespoły parowe początku XXI w.                                                                                           | 563        |
| 6.4.1. Turbozespoły dużych mocy do realizacji potrzeb specjalnych, przykład: Alsthom w Seward Power Plant rekultywujący środowisko | 563        |
| 6.4.2. Zmierzch turbozespołów parowych tarczowych komorowych w obszarze dużych mocy                                                | 567        |
| 6.4.3. Rewitalizacja siłowni i turbin parowych i przyjazna otoczeniu modernizująca od- i rozbudowa                                 | 568        |
| 6.4.3.1. Rewitalizacja turbin parowych dużych mocy                                                                                 | 568        |
| 6.4.3.2. Retrofit czterokadłubowych bloków LMZ 500 MW w siłowniach na węgiel brunatny w dawnym NRD                                 | 570        |
| 6.4.3.3. Retrofit części WP/SP bloków GE G2 555 MW w siłowni San Antonio Spruce Plant (CPS) uruchomionych w 1992 r.                | 573        |
| 6.5. Turbiny gazowe                                                                                                                | 576        |
| 6.5.1. Turbiny spalinowe                                                                                                           | 576        |
| 6.5.2. Turbiny aerodynamiczne                                                                                                      | 577        |
| 6.5.3. Problemy rekuperacji ciepła oraz międzystopniowego spalania w turbinach i schładzania w sprężarkach                         | 580        |
| 6.5.4. Turbiny spalinowe stacjonarne przełomu wieków                                                                               | 583        |
| 6.6. Siłownie parowo-gazowe                                                                                                        | 584        |
| 6.7. Turbozespoły parogazowe                                                                                                       | 587        |
| <b>LITERATURA</b>                                                                                                                  | <b>591</b> |
| <b>SKOROWIDZ</b>                                                                                                                   | <b>593</b> |
| <b>WYKAZ RYSUNKÓW I TABEL</b>                                                                                                      | <b>599</b> |