

Spis treści

Wykaz oznaczeń	11
Wstęp	15
Część I. Łożyskowanie gazowe	17
Zasada działania łożysk gazowych, ich podział i cechy charakterystyczne	17
1.1. Własności gazów jako środków smarujących	17
1.2. Podział łożysk gazowych oraz zasada ich działania	19
1.2.1. Łożyska samodiałające	19
1.2.2. Łożyska zasilane	21
1.2.3. Podział łożysk ze względu na kierunek przenoszonych obciążeń	24
1.3. Zalety i wady łożysk gazowych	24
Podstawy teoretyczne przepływu gazu przez łożyska	26
2.1. Podstawowe równanie ciśnienia w filmie gazowym	26
2.1.1. Łożyska cylindryczne	27
2.1.2. Łożyska stożkowe i wzdłużne	33
2.1.3. Uprozczone rozwiązanie równania ciśnienia w filmie w otoczeniu źródła masy	35
2.2. Opis rzeczywistych zjawisk związanych z zasilaniem łożysk gazowych przez małe otworki	38
2.2.1. Stosowane systemy zasilania filmów gazowych	38
2.2.2. Jednolity opis przepływu przez komorowy i bezpośredni system zasilania	40
2.2.3. Obliczanie strumienia masy źródła	46
Numeryczne rozwiązanie zagadnień przepływu gazu przez łożyska	47
3.1. Łożyska cylindryczne	48
3.1.1. Algorytm numerycznego rozwiązania równania podstawowego łożysk cylindrycznych	50
3.1.2. Obliczenie składowych sił, momentów i strumienia masy gazu płynącego przez łożysko	56
3.1.3. Warunki zbieżności procesu obliczeniowego i weryfikacja uzyskanych wyników	58

3.2. Łożyska wzdłużne	61
3.2.1. Algorytm rozwiązania równania podstawowego zasilanych łożysk wzdłużnych	63
3.2.2. Zbieżność procesu obliczeniowego i weryfikacja otrzymanych wyników	66
4. Charakterystyki bezwymiarowe łożysk gazowych	68
4.1. Charakterystyki nośności	68
4.1.1. Charakterystyki nośności łożysk cylindrycznych	68
4.1.2. Charakterystyki nośności zasilanych łożysk wzdłużnych	74
4.1.3. Porównanie charakterystyk obliczeniowych z eksperymentalnymi	77
4.2. Charakterystyki przepływu masy	81
4.2.1. Charakterystyka przepływu łożysk cylindrycznych	82
4.2.2. Charakterystyka przepływu łożysk wzdłużnych	83
4.3. Analiza wpływu liczb kryterialnych na charakterystyki bezwymiarowe łożysk cylindrycznych	83
4.4. Ocena efektywności wytworzenia jednostki siły nośnej w cylindrycznych łożyskach gazostatycznych	84
5. Metody obliczeń łożysk gazowych	87
5.1. Obliczanie łożysk cylindrycznych samodiałających	88
5.1.1. Obliczanie siły nośnej	88
5.1.2. Obliczenie kąta położenia czopa	92
5.1.3. Obliczanie strat ciepła	92
5.2. Obliczanie cylindrycznych łożysk zasilanych	96
5.2.1. Zbiór charakterystyk nośności	97
5.2.2. Charakterystyki przepływu	109
5.2.3. Obliczanie optymalizacyjne łożyska ze względu na maksymalną nośność	111
5.2.4. Obliczenia optymalizacyjne łożyska ze względu na maksymalną sztywność	123
5.2.5. Obliczenie strat tarcia	125
5.3. Obliczanie łożysk samodiałających promieniowych z segmentami samonastawnymi	125
5.4. Obliczanie łożysk osiowych samodiałających	128
5.4.1. Łożyska z rowkami spiralnymi	128
5.4.2. Łożyska z segmentami progowymi	131
5.4.3. Łożyska z segmentami samonastawnymi	134
5.5. Obliczanie zasilanych łożysk wzdłużnych	137
5.5.1. Obliczenie nośności i przepływu na podstawie charakterystyk bezwymiarowych	137
5.5.2. Obliczenie strat tarcia	142
6. Stabilność łożysk gazowych	143
6.1. Rodzaje niestabilności, przyczyny ich powstawania i sposób analizy	143
6.2. Reakcje filmu gazowego na nieustalone przesunięcia czopa w łożysku	147
6.2.1. Reakcja filmu na skokowe wychylenie translacyjne	147
6.2.2. Reakcja filmu na skokowe wychylenie kątowe	150
6.2.3. Reakcja filmu na ruch drgający czopa	151
6.3. Próg stabilności łożysk cylindrycznych z panwiami podpartymi sztywno	154
6.3.1. Ruch translacyjny na granicy stabilności	154
6.3.2. Ruch stożkowy na granicy stabilności	158
6.3.3. Przykład obliczenia progu stabilności i porównanie wyników z eksperymentem	161
6.3.4. Oszacowanie granicznych częstości obrotów	164
6.4. Próg stabilności łożysk cylindrycznych z panwiami podpartymi elastycznie	165

6.4.1. Charakterystyki dynamiczne elastycznych pierścieni podpierających panwie łożyskowe	167
6.4.2. Równania służące do wyznaczania progu stabilności przy elastycznym podparciu panwi	169
6.4.3. Przykład obliczeniowy i porównanie wyników z eksperymentem	175
6.4.4. Optymalne rozwiązania dla elastycznych podparć panwi	177
6.5. Rezonans synchroniczny	180
6.5.1. Drgania synchroniczne, zjawisko inwersji	181
6.5.2. Przechodzenie obszaru drgań synchronicznych	182
6.6. Niestabilności zasilania	184
6.6.1. Obliczanie zakresu stabilnej pracy płaskiego łożyska wzdłużnego z zasilaniem komorowym	184
6.6.2. Zapobieganie niestabilności typu „młot pneumatyczny”	189
7. Badanie eksperymentalne łożysk gazowych	189
7.1. Aparatura pomiarowa	190
7.2. Badania łożysk gazostatycznych	191
7.2.1. Łożyska promieniowe	191
7.2.2. Łożyska wzdłużne	193
7.3. Badania cylindrycznych łożysk hybrydowych	195
7.3.1. Eksperymentalne wyznaczanie progu stabilności i drgań synchronicznych	195
7.3.2. Badania nośności zasilanych i samodiałających łożysk promieniowych	197
Część II. Napęd mikroturbinowy	199
8. Zasada działania mikroturbin, ich podział, cechy charakterystyczne i zastosowania	199
8.1. Stopień osiowy	200
8.2. Stopień promieniowy i stopień o przepływie stycznym	202
8.3. Podział mikroturbin, ich charakterystyczne cechy i zastosowania	203
9. Podstawy teoretyczne przepływu przez stopnie mikroturbinowe	205
9.1. Przepływ przez wieniec kierujący	205
9.1.1. Przemiana termodynamiczna w kanale kierującym	205
9.1.2. Kształt kanału rozprężającego pod- i naddźwiękowego	208
9.1.3. Kąt wypływu strugi z kierownicy, odchylenie w skośnym ściegu	210
9.1.4. Przykłady wieńców kierujących mikroturbin	212
9.1.5. Straty występujące w kanałach kierujących i wskaźniki strat	214
9.1.6. Przelotność kanałów kierujących	218
9.2. Przepływ przez wieniec wirujący	222
9.2.1. Przemiana termodynamiczna w wirniku, przekazywanie energii, trójkąty prędkości	222
9.2.2. Częściowe zasilanie wirnika, obliczenie wysokości łopatek	227
9.2.3. Udział dynamiczny wirnika	229
9.2.4. Przykłady wieńców wirujących mikroturbin	230
9.3. Podstawowe straty w stopniu, sprawność napędu	232
9.4. Straty uboczne w stopniach mikroturbinowych	236
9.4.1. Straty brodzenia tarczy	236
9.4.2. Straty częściowego zasilania	237
9.4.3. Straty przecieków czynnika	240
9.5. Bilans strat w stopniu, sprawność efektywna	242

10. Badania eksperymentalne stopni mikroturbinowych	243
10.1. Postać charakterystyk bezwymiarowych	243
10.2. Wpływ częściowego zasilania na sprawność stopnia mikroturbiny	245
10.2.1. Optymalna wartość wskaźników prędkości	245
10.2.2. Optymalny związek między stopniem zasilania a wysokością łopatki	248
10.2.3. Wpływ rozmieszczenia kanałów kierujących na sprawność stopnia	250
10.3. Wpływ strat brodzenia tarczy wirującej i strat przecieków na sprawność mikroturbiny	252
10.4. Wpływ liczby stopni na sprawność mikroturbiny	254
10.5. Charakterystyki jednostkowego zużycia gazu	256
10.6. Stanowiska badawcze mikroturbin	259
10.6.1. Hamulce do pomiaru mocy mikroturbin	259
10.6.2. Obwód przepływu czynnika i schemat pomiarowy stanowiska badawczego mikroturbin	266
11. Metody obliczania mikroturbin	269
11.1. Podstawowe dane do obliczeń	269
11.2. Metoda obliczania oparta na wskaźnikach strat cząstkowych	269
11.2.1. Zasady wyboru podstawowych parametrów stopnia	270
11.2.2. Przykład obliczenia mikroturbiny	271
11.3. Obliczanie stopnia w oparciu o wyniki badań modelowych	275
11.3.1. Podstawowe założenia metody obliczeń	275
11.3.2. Wymiary geometryczne rozpatrywanej rodziny mikroturbin	276
11.3.3. Eksperymentalna metoda optymalizacji podstawowych parametrów stopnia	277
11.3.4. Charakterystyki optymalnych parametrów mikroturbiny — wykresy zbiorcze, wykresy uproszczone	278
11.3.5. Obliczanie mikroturbiny na podstawie charakterystyk zbiorczych — sposób postępowania	280
11.3.6. Przykład obliczeniowy	282
11.3.7. Kryteria podobieństwa w mikroturbinach i ocena zakresu stosowności metody obliczeń	283
Część III. Zagadnienia konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne łożysk gazowych i napędów mikroturbinowych	285
12. Rozwiązania konstrukcyjne łożysk gazowych oraz napędów mikroturbinowych	285
12.1. Aparatura fizyczna, pomiarowa i wiertarki medyczne	286
12.1.1. Aparatura fizyczna	286
12.1.2. Aparatura pomiarowa	290
12.1.3. Wiertarki medyczne	290
12.2. Wysokoobrotowe wrzeciona obrabiarek	294
12.3. Elementy wirujące maszyn włókienniczych	297
12.4. Duże wrzecienniki szlifierskie	301
12.5. Wirnikowe maszyny przepływowe	306
12.5.1. Sprężarki i pompy	306
12.5.2. Silniki turbospalinowe i turbozespoły rozprężne	307
12.6. Specjalne rozwiązania łożyskowania gazowego o zwiększonej sztywności	311
12.6.1. Łożyska z panwią kompensującą przesunięcie wału	311
12.6.2. Łożyska z regulacją elementów dławiących zasilających film gazowy	314
12.6.3. Łożyska o zmiennym kształcie szczeliny łożyskowej	316

13. Zagadnienia technologiczne i eksploatacyjne łożysk gazowych	317
13.1. Problemy materiałowe łożysk gazowych	317
13.1.1. Wymagania stawiane materiałom łożysk gazowych	318
13.1.2. Materiały metaliczne i tworzywa grafitowe	320
13.1.3. Pokrycia tworzące powierzchnie robocze łożysk gazowych	322
13.2. Zagadnienia wykonawcze łożysk gazowych	329
13.2.1. Wykonywanie elementów łożysk gazowych	329
13.2.2. Wymagania montażowe	332
13.2.3. Wymagania dotyczące wyważania wirników podpartych na łożyskach gazowych	333
13.3. Zagadnienia eksploatacyjne	336
Literatura	338
Skorowidz rzeczowy	345