

Spis treści

WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	11
WSTĘP	13
1. ATMOSFERA ZIEMSKA, FIZYCZNE WŁAŚCIWOŚCI POWIETRZA	15
1.1. Atmosfera ziemska	15
1.1.1. Międzynarodowa atmosfera wzorcowa	18
1.2. Fizyczne właściwości powietrza	20
1.2.1. Gęstość powietrza	20
1.2.2. Ciśnienie powietrza	20
1.2.3. Lepkość powietrza	21
1.2.4. Ściśliwość powietrza	22
2. AERODYNAMIKA MAŁYCH PRĘDKOŚCI	23
2.1. Przepływ powietrza z małą prędkością ($M < 0,3$)	23
2.1.1. Równanie stałego wydatku (ciągłości strugi)	23
2.1.2. Równanie Bernoulliego	25
2.1.3. Liczba Reynoldsa	27
2.2. Warstwa przyścienna	28
2.2.1. Laminarna warstwa przyścienna (przepływ laminarny)	29
2.2.2. Turbulentna warstwa przyścienna, przepływ turbulentny	30
2.2.3. Punkt przejścia warstwy przyściennej laminarnej w turbulentną	31
2.2.4. Punkt oderwania warstwy przyściennej	32
2.2.5. Opływ profilu skrzydła	33
2.3. Siły aerodynamiczne	36
2.3.1. Całkowita siła aerodynamiczna	36
2.3.2. Siła nośna i środek parcia	38
2.3.3. Siła oporu D	42
2.3.3.1. Opór indukowany	45
2.3.3.2. Opór szkodliwy	46
2.3.3.3. Biegunowa samolotu	47
2.3.3.4. Doskonałość aerodynamiczna samolotu L/D	48
2.4. Rodzaje profili lotniczych	49
2.4.1. Profile klasyczne	51
2.4.2. Profile laminarne	51
2.5. Układ aerodynamiczny samolotów małych prędkości	54

2.5.1. Skrzydła samolotu	54
2.5.1.1. Położenie skrzydeł względem podłużnej osi samolotu (układ samolotu)	54
2.5.1.2. Obrys skrzydeł	54
2.5.1.3. Wydłużenie skrzydeł	56
2.5.1.4. Zbieżność skrzydeł	57
2.5.1.5. Skręcenie geometryczne skrzydeł	57
2.5.1.6. Skręcenie aerodynamiczne skrzydeł	58
2.6. Mechanizacja skrzydeł	59
2.6.1. Klapy krawędzi spływu (klapy lądowania)	59
2.6.2. Klapy krawędzi natarcia (klapy przednie)	61
2.6.3. Sloty	62
2.6.4. Sterowanie warstwą przyścienną	63
2.7. Kadłub i usterzenie samolotu	63
3. AERODYNAMIKA DUŻYCH PRĘDKOŚCI	65
3.1. Dźwięk, fale dźwiękowe, liczba Macha	65
3.1.1. Prędkość dźwięku	66
3.1.2. Liczba Macha	67
3.2. Rozchodzenie się fal dźwiękowych	68
3.2.1. Źródło dźwięku pozostaje nieruchome	68
3.2.2. Źródło dźwięku porusza się z prędkością mniejszą niż prędkość dźwięku	69
3.2.3. Prędkość źródła dźwięku jest równa prędkości dźwięku	69
3.2.4. Prędkość źródła dźwięku jest większa niż prędkość dźwięku	70
3.3. Fale uderzeniowe	71
3.4. Poddźwiękowy i naddźwiękowy strumień powietrza	75
3.4.1. Dysza Laval'a	75
3.4.2. Rozpędzanie strumienia powietrza od prędkości poddźwiękowej do naddźwiękowej	78
3.4.3. Hamowanie poddźwiękowego strumienia powietrza	78
3.4.4. Hamowanie naddźwiękowego strumienia powietrza	79
3.5. Rozwój fal uderzeniowych na profilu skrzydła, kryzys falowy	80
3.5.1. Rozchodzenie się fal dźwiękowych w przepływie przy $M_1 < M_{kr}$	81
3.5.2. Rozchodzenie się fal dźwiękowych w przepływie przy $M_2 = M_{kr}$	81
3.5.3. Rozchodzenie się fal dźwiękowych w przepływie przy $M_{kr} < M_3 < 1$, rozwój fal uderzeniowych	82

3.5.4. Naddźwiękowy przepływ powietrza	84
3.6. Wpływ ściśliwości powietrza na charakterystyki aerodynamiczne samolotu	85
3.6.1. Zależność współczynnika siły nośnej C_L od liczby Macha	85
3.6.2. Zależność współczynnika siły oporu od liczby Macha	86
3.7. Wpływ zmiany kąta natarcia na powstanie i rozwój kryzysu falowego	87
3.8. Układ aerodynamiczny samolotów okołodźwiękowych i naddźwiękowych	89
3.8.1. Profile laminarne	89
3.8.2. Profile nadkrytyczne	93
3.8.3. Profile szybkościowe	94
3.9. Obrys skrzydeł	98
3.9.1. Skrzydła o skosie dodatnim	98
3.9.2. Skrzydła o skosie ujemnym	104
3.9.3. Skrzydła o zmiennym skosie	107
3.10. Skrzydła o małym wydłużeniu	108
3.10.1. Skrzydła trójkątne	110
3.11. Skrzydła pasmowe	114
3.12. Kadłub	116
3.12.1. Reguła pól	117
3.13. Dyfuzor wlotowy	118
3.13.1. Dyfuzor poddźwiękowy	118
3.13.2. Dyfuzor naddźwiękowy	119
3.14. Układ aerodynamiczny samolotu F-16	121
3.14.1. Skrzydła pasmowe i ich mechanizacja	122
3.14.2. Usterzenie samolotu	124
3.14.3. Układy hamujące samolotu	125
3.14.4. Kadłub i wlot powietrza do silnika	125
3.14.5. Silnik F100-PW-229	125
3.14.6. Elektryczny system sterowania samolotem	126
4. MECHANIKA LOTU SAMOLOTU	127
4.1. Wiadomości wstępne	127
4.1.1. Układ odniesienia	127
4.1.2. Siły i momenty działające na samolot w czasie lotu	128
4.2. Samolot F-16 – obliczenia aerodynamiczne	130
4.2.1. Indeks oporu DI (<i>drag index</i>), ciężar konfiguracji W (<i>configuration weight</i>)	131
4.2.2. Poprawki do obliczeń parametrów lotu	132
4.2.3. Pojęcia prędkości samolotu	133

4.3. Charakterystyki zespołu napędowego	133
4.4. Ruch ustalony samolotu	136
4.4.1. Możliwości wykonywania ustalonego lotu samolotu w atmosferze ziemskiej	136
4.5. Ustalony lot poziomy	140
4.6. Ustalony lot wznoszący	151
4.6.1. Kąt ustalonego wznoszenia	152
4.6.2. Prędkość pionowego wznoszenia	153
4.6.2.1. Pionowa prędkość wznoszenia przy różnych wysokościach lotu. Pułap samolotu	155
4.7. Wznoszenie samolotu F-16	159
4.8. Ustalony lot samolotu ze zniżaniem. Lot szybowy	159
4.9. Zasięg i długotrwałość lotu	162
4.9.1. Wpływ prędkości samolotu na zużycie paliwa w locie poziomym	164
4.9.2. Wpływ wysokości lotu na zużycie paliwa w locie poziomym	165
4.9.3. Wpływ ciężaru samolotu, podwieszeń i temperatury otoczenia na zużycie paliwa w locie poziomym	166
4.10. Zasięg samolotu F-16	166
4.11. Ruch nieustalony samolotu	167
4.11.1. Rozpędzanie samolotu w locie poziomym	167
4.11.1.1. Wpływ wysokości lotu na rozpędzanie samolotu w locie poziomym	170
4.11.1.2. Wpływ ciężaru i podwieszeń na rozpędzanie samolotu w locie poziomym	171
4.11.1.3. Wpływ zniżania na rozpędzanie samolotu	172
4.12. Rozpędzanie samolotu F-16	174
4.13. Hamowanie samolotu w locie poziomym	175
4.13.1. Wpływ wznoszenia na hamowanie samolotu	178
4.14. Hamowanie samolotu F-16	180
4.15. Energia mechaniczna samolotu	180
4.15.1. Wysokość energetyczna samolotu	181
4.15.2. Program lotu samolotu umożliwiający osiągnięcie w najkrótszym czasie danej wysokości i prędkości	184
4.15.3. Pułap dynamiczny samolotu	187
4.15.4. Lot samolotu na wysokościach dynamicznych	188
4.16. Akrobacja	189
4.16.1. Przeciążenia samolotu wysterowane przez pilota	189
4.16.2. Zależność między największymi możliwymi przeciążeniami normalnymi a prędkością przyrządową samolotu	192

4.16.3. Zależność między największymi możliwymi ustalonymi przeciążeniami normalnymi a prędkością i wysokością lotu oraz ciężarem samolotu	195
4.16.4. Zależność największych możliwych ustalonych przeciążeń normalnych samolotu od ciągu silnika	197
4.16.5. „Zarzut” przeciążenia	198
4.16.6. Wpływ dużego ciągu jednostkowego na wykonywanie manewrów	198
4.17. Ograniczenia użytkowe samolotu	199
4.17.1. Ograniczenia wytrzymałościowe samolotu	199
4.17.2. Ograniczenia samolotu ze względu na stateczność i sterowność	201
4.18. Ograniczenia samolotu F-16	202
4.19. Zakręt	205
4.19.1. Prędkość minimalna i graniczna przechylenia samolotu w zakręcie	208
4.19.2. Zakręt z wyslizgiem	210
4.19.3. Zakręt z ześlizgiem	210
4.20. Zakręt samolotu F-16	211
4.21. Nurkowanie i wyprowadzenie z nurkowania	212
4.22. Wyprowadzenie z nurkowania samolotu F-16	218
4.23. Górka	219
4.24. Zwrot bojowy	223
4.25. Przewrót	224
4.26. Pętla	226
4.27. Immelman	229
4.28. Lot odwrócony	230
4.29. Beczka	232
4.30. Spirala	238
4.30.1. Stroma spirala	242
4.31. Przecignięcie samolotu	244
4.31.1. Przecignięcie statyczne	244
4.31.2. Głębokie przecignięcie	248
4.31.3. Dynamiczne przecignięcie	249
4.32. Przecignięcie samolotu F-16	249
4.33. Głębokie przecignięcie dynamiczne	252
4.34. Korkociąg	255
4.34.1. Samoobrót samolotu ze skośnymi skrzydłami	258
4.34.2. Siły i momenty działające na samolot w korkociągu	259
4.34.3. Normalny korkociąg stateczny, równomierny	264
4.34.4. Normalny korkociąg stateczny z wahaniami	266
4.34.5. Normalny korkociąg niestateczny z energicznymi wahaniami	267

4.34.6. Korkociąg niestateczny „opadanie liściem”	268
4.34.7. Korkociąg niestateczny z narastającymi wahaniami	269
4.34.8. Wyprowadzanie samolotu z korkociągu	270
4.34.9. Błędy popełniane przez pilotów podczas wyprowadzania samolotu z korkociągu	275
4.35. Korkociąg samolotu F-16	276
4.36. Start samolotu	277
4.36.1. Rozbieg samolotu	278
4.36.2. Oderwanie samolotu od ziemi	281
4.36.3. Długość i czas rozbiegu	282
4.36.4. Wznoszenie i rozpędzanie samolotu podczas startu	282
4.36.5. Długość i czas startu samolotu	283
4.36.6. Wpływ kąta natarcia samolotu na długość i czas startu	283
4.36.7. Wpływ wiatru na długość i czas startu samolotu	285
4.36.8. Wpływ ciężaru samolotu na długość startu	287
4.36.9. Wpływ temperatury i ciśnienia otoczenia na długość startu samolotu	288
4.36.10. Wpływ stanu drogi startowej na długość startu samolotu	289
4.37. Start samolotu F-16	290
4.38. Lądowanie	293
4.38.1. Szybowanie	294
4.38.2. Wyrównanie	296
4.38.3. Wytrzymanie i przyziemienie	297
4.38.4. Dobieg	300
4.38.5. Lądowanie z bocznym wiatrem	302
4.38.6. Lądowanie z wyłączonym silnikiem	303
4.38.7. Błędy popełniane podczas lądowania	304
4.39. Hydrodynamiczny poślizg samolotu	307
4.40. Lądowanie samolotu F-16	311
4.41. Stateczność i sterowność samolotu	315
4.41.1. Zrównoważenie samolotu	315
4.41.2. Ognisko aerodynamiczne skrzydła i samolotu	316
4.41.3. Zrównoważenie samolotu przy pomocy steru (statecznika) wysokości ..	320
4.42. Stateczność podłużna samolotu	322
4.42.1. Statyczna stateczność podłużna przy zmianie przeciążenia	322
4.42.1.1. Wpływ wyważenia samolotu na stateczność statyczną podłużną	326
4.42.1.2. Wpływ liczby M na stateczność statyczną podłużną samolotu	329

4.43. Stateczność dynamiczna podłużna samolotu	331
4.43.1. Stateczność dynamiczna podłużna samolotu przy zmianie przeciążenia normalnego	331
4.43.2. Ocena stateczności statycznej i dynamicznej samolotu przy zmianie przeciążenia	332
4.43.3. Podłużna stateczność dynamiczna przy zmianie prędkości	333
4.44. Sterowność podłużna samolotu	337
4.44.1. Siły na drążku sterowym	337
4.44.2. Efektywność steru (statecznika) poziomego – zależność od liczby M ...	338
4.44.3. Związek sterowności ze statecznością podłużną samolotu	342
4.44.4. Wahania podłużne samolotu wywołane przez pilota	344
4.45. Stateczność podłużna samolotu F-16	347
4.46. Stateczność poprzeczna samolotu	350
4.46.1. Stateczność poprzeczna statyczna samolotu	350
4.46.2. Stateczność poprzeczna dynamiczna samolotu	355
4.47. Sterowność poprzeczna samolotu	357
4.48. Stateczność statyczna kierunkowa samolotu	359
4.49. Sterowność kierunkowa samolotu.....	364
4.50. Stateczność statyczna i dynamiczna boczna samolotu	364
4.51. Sterowność boczna samolotu	371
4.52. Stateczność kierunkowa samolotu F-16	372
4.53. Samoobrót bezwładnościowy samolotu	373
4.53.1. Związek aerodynamiczny ruchu bocznego i podłużnego samolotu	373
4.53.2. Związek kinematyczny ruchu bocznego i podłużnego	374
4.53.3. Związek bezwładnościowy ruchu bocznego i podłużnego samolotu	376
4.53.4. Samoobrót bezwładnościowy samolotu	377
4.53.5. Warunki wejścia samolotu w samoobrót bezwładnościowy	379
5. SZCZEGÓLNE PRZYPADKI W LOCIE	383
5.1. Drgania buffeting	383
5.1.1. Drgania buffeting samolotu F-16	384
5.2. Aeroelastyczność	385
5.2.1. Skręcanie skrzydła skośnego podczas zginania	386
5.2.2. Rewers lotek	387
5.2.3. Wpływ aeroelastyczności na stateczność samolotu przy zmianie przeciążenia	388
5.2.4. Drgania flutter	389
5.3. Lot w burzliwej atmosferze	392
5.4. Obłodzenie samolotu	393

5.5. Zawirowania za samolotem	397
5.6. Skutki działania fal uderzeniowych na samolot i na obiekty naziemne	401
5.6.1. Oddziaływanie fali uderzeniowej na samolot przelatujący przez nią	405
5.6.2. Skutki oddziaływania fal uderzeniowych na ziemię	407
ZAŁĄCZNIKI	409
WYKAZ LITERATURY	443