

SPIS TREŚCI

Wykaz wybranych oznaczeń i skrótów	7
Wstęp	13
1. Ruch lotniczy	15
1.1. Organizacja ruchu lotniczego	15
1.2. Rola i zadania służb ruchu lotniczego	18
1.3. Organizacja ruchu dolotowego w rejonie zbliżania	23
1.3.1. Procedura dolotowa statków powietrznych do lotniska STAR	23
1.3.2. Rozszerzony system zarządzania przylotami AMAN	26
1.3.3. Systemowa metoda organizacji ruchu dolotowego PMS	29
1.4. Organizacja procesów w ruchu naziemnym	35
1.4.1. Zarządzanie operacjami startu DMAN	35
1.4.2. Wspólna platforma podejmowania decyzji A-CDM	37
1.4.3. Charakterystyka obsługi naziemnej statków powietrznych	41
2. Stan badań	55
3. Cel i zakres pracy	69
4. Wybrane metody analizy procesów w ruchu lotniczym	73
4.1. Klasyfikacja metod teorii szeregowania	73
4.1.1. Podstawowe pojęcia w teorii szeregowania	81
4.1.2. Algorytmy przybliżone w szeregowaniu zadań w ruchu lotniczym	84
4.1.3. Algorytmy priorytetowe w szeregowaniu zadań w ruchu lotniczym	87
4.2. Algorytmy heurystyczne w ruchu lotniczym	90
4.2.1. Charakterystyka wybranych metod heurystycznych	90
4.2.2. Podejście metaheurystyczne do szeregowania lądujących statków powietrznych	95
4.2.3. Heurystyka populacyjna w lądowaniu statków powietrznych	98
4.3. Wybrane wielokryterialne problemy decyzyjne	102
4.3.1. Rodzaje metod optymalizacji wielokryterialnej	102
4.3.2. Metoda analizy hierarchicznej problemu AHP	110
4.3.3. Przykład zastosowania metody AHP	117
4.3.4. Metoda przedziałowa TOPSIS	121
5. Badanie dolotowego ruchu statków powietrznych	126
5.1. Wstęp	126

5.2. Modelowanie ruchu dolotowego statków powietrznych	127
5.3. Schematy łączenia lądujących statków powietrznych	132
5.4. Zapis matematyczny	134
5.5. Zastosowanie sieci Petriego w ruchu lotniczym	138
5.5.1. Charakterystyka i podział sieci Petriego	138
5.5.2. Zapis modelu w postaci sieci Petriego	141
5.5.3. Weryfikacja modelu	144
5.5.4. Implementacja modelu na przykładowym lotnisku	145
5.5.5. Scenariusze eksperymentów symulacyjnych	148
5.5.6. Uzyskane wyniki symulacji	155
5.6. Modelowanie symulacyjne ruchu dolotowego	156
5.6.1. Opis zastosowanego narzędzia symulacyjnego	156
5.6.2. Scenariusze realizacji dolotowego ruchu statków powietrznych do lotniska	160
5.6.3. Weryfikacja modelu	163
5.6.4. Uzyskane wyniki symulacji ruchu dolotowego	164
6. Modelowanie procesów w ruchu naziemnym	168
6.1. Zastosowanie teorii masowej obsługi w ruchu naziemnym	168
6.2. Analiza procesu obsługi naziemnej statku powietrznego	176
6.2.1. Dane wejściowe i opracowane scenariusze w modelu	176
6.2.2. Model symulacyjny	178
6.2.3. Weryfikacja modelu	180
6.2.4. Wyniki symulacji	183
6.3. Operacje naziemne statków powietrznych	187
6.4. Sekwencjonowanie przedstartowe statków powietrznych	190
Podsumowanie i wnioski	200
Literatura	204
Spis tabel	218
Spis rysunków	220

SPIS TABEL

Tabela 1. Kamienie milowe w A-CDM.....	38
Tabela 2. Charakterystyka metod szeregowania.....	77
Tabela 3. Przykład zgłoszeń statków powietrznych do bram TMA.....	87
Tabela 4. Uszeregowanie zadań według LPT, SPT, RPT oraz FIFO.....	89
Tabela 5. Separacje odległościowe dla sekwencji statków powietrznych.....	96
Tabela 6. Przykładowe sekwencje lądujących statków powietrznych.....	97
Tabela 7. Interwały czasowe wykonania operacji lądowania.....	99
Tabela 8. Obliczenia dla określenia niedostosowania heurystyki populacyjnej.....	101
Tabela 9. Skala preferencji oznaczenia stopnia przewagi elementów.....	113
Tabela 10. Przykład macierzy preferencji.....	115
Tabela 11. Losowy index <i>RI</i>	116
Tabela 12. Macierz parowych porównań dla kryteriów – macierz A.....	119
Tabela 13. Znormalizowana macierz – macierz B oraz wagi dla poszczególnych kryteriów.....	119
Tabela 14. Wartości indeksów spójności dla poszczególnych kryteriów.....	120
Tabela 15. Ocena uszeregowania ze względu na poszczególne kryteria.....	121
Tabela 16. Charakterystyka przyjętych kryteriów wraz z ich wagą.....	121
Tabela 17. Matryca decyzyjna.....	122
Tabela 18. Matryca znormalizowana.....	122
Tabela 19. Wazona matryca znormalizowana.....	123
Tabela 20. Wartości dodatnie i ujemne idealnych rozwiązań.....	123
Tabela 21. Odległość do dodatnich i ujemnych punktów idealnych.....	124
Tabela 22. Względny stopień C_i zbliżenia alternatyw do rozwiązania idealnego.....	124
Tabela 23. Zestawienie danych statystycznych próbek <i>Real</i> i <i>Sym</i>	144
Tabela 24. Iloraz wariancji badanych próbek.....	145
Tabela 25. Minimum separacji pomiędzy przylatującymi statkami powietrznymi.....	148
Tabela 26. Warianty zgłaszania się statków powietrznych oraz przykładowy plan lotu.....	149
Tabela 27. Wyniki statystyczne dla scenariusza nr 1 – 1L.....	150
Tabela 28. Trasy przelotu statków powietrznych w scenariuszu nr 2 – 2L.....	151
Tabela 29. Wartości statystyczne dla scenariusza nr 2 – 2L.....	153
Tabela 30. Wartości statystyczne dla założonych wariantów scenariusza 3L.....	154
Tabela 31. Zestawienie wyników eksperymentów.....	155
Tabela 32. Zestawienie danych statystycznych próbek <i>Real</i> i <i>Sim</i> czasów w TMA.....	163
Tabela 33. Wyniki symulacji dla założonych scenariuszy – liczba korekty prędkości.....	166
Tabela 34. Zestawienie wyników eksperymentów.....	167
Tabela 35. Zestawienie wyników eksperymentów.....	175

Tabela 36. Wartości przyjętych prawdopodobieństw wystąpienia zakłóceń dla różnych sekwencji czynności	178
Tabela 37. Zestawienie wyników symulacji wariantów z rzeczywistymi pomiarami.....	181
Tabela 38. Ścieżki krytyczne dla poszczególnych wariantów	183
Tabela 39. Zestawienie wybranych wyników symulacji uwzględniający zakłócenia – średnie czasy trwania czynności elementarnych [min:ss].....	185
Tabela 40. Ścieżki krytyczne dla scenariuszy symulacyjnych z zakłóceniami.....	186
Tabela 41. Istotne kamienie milowe podczas planowania operacji startu	188

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Budowa i elementy przestrzeni powietrznej w FIR Warszawa.....	16
Rys. 2. Struktura ruchu lotniczego i naziemnego	18
Rys. 3. Struktura służb ruchu lotniczego	19
Rys. 4. Przestrzeń powietrzna nad lotniskiem oraz obszary odpowiedzialności służb kontroli ruchu lotniczego.....	21
Rys. 5. Przykładowa procedura dolotowa STAR obowiązująca dla Lotniska Chopina	25
Rys. 6. Przykładowe rozmieszczenie stref oczekiwania w procedurze STAR	26
Rys. 7. Schemat działania AMAN	28
Rys. 8. Zasada działania systemu AMAN – widok w pionie i poziomie.....	29
Rys. 9. Sposób zarządzania operacjami lotniczymi.....	30
Rys. 10. Trajektorie lotów statków powietrznych przed i po wprowadzeniu systemu PMS.....	31
Rys. 11. Przykład struktury w postaci dwóch stożków.....	31
Rys. 12. Struktura układu PMS.....	32
Rys. 13. Kąty w układzie PMS	32
Rys. 14. Źródła pozyskiwania danych do systemu DMAN.....	36
Rys. 15. Etapy procesu obsługi naziemnej statku powietrznego	42
Rys. 16. Czynności elementarne obsługi naziemnej statku powietrznego.....	43
Rys. 17. Przykładowe rozmieszczenie urządzeń podczas obsługi naziemnej	44
Rys. 18. Wykres Gantta reprezentacji procesu obsługi naziemnej	49
Rys. 19. Zakłócenia podczas obsługi naziemnej.....	53
Rys. 20. Podział metod szeregowania.....	77
Rys. 21. Klasyfikacja metod heurystycznych	91
Rys. 22. Sposób rozwiązywania problemu decyzyjnego.....	103
Rys. 23. Ogólny schemat wyboru najlepszego rozwiązania z decyzji optymalnych.....	104
Rys. 24. Struktura hierarchiczna	112
Rys. 25. Drzewo decyzyjne wyboru sekwencji statków powietrznych	118
Rys. 26. Preferencje lokalne dla poszczególnych kryteriów.....	120
Rys. 27. Struktura obszaru zbliżania TMA dla przykładowego lotniska.....	128
Rys. 28. Przykład sytuacji kolizyjnej podczas łączenia tras dolotowych	130
Rys. 29. Przykład innej sytuacji kolizyjnej podczas łączenia się tras dolotowych.....	130
Rys. 30. Problematiczny fragment trasy	131
Rys. 31. Ogólny schemat łączenia tras lądujących statków powietrznych.....	132
Rys. 32. Przykład realizacji skrótów podczas łączenia strumieni lądujących statków powietrznych..	133
Rys. 33. Przykładowe grafy odzwierciedlające sposoby łączenia a) 1L, b) 2L.....	134
Rys. 34. Przykładowa sieć Petriego	140

Rys. 35. Utworzenie sekwencji statków powietrznych do obsłużenia.....	142
Rys. 36. Strona odpowiadająca za modyfikację sekwencji w celu zachowania separacji	143
Rys. 37. Histogramy częstości występowania obserwacji dla 1L i 3L	145
Rys. 38. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa zmiennych dla 1L i 3L	145
Rys. 39. Schemat procedury STAR dla Chopin Airport – runway RWY 11.....	146
Rys. 40. Jednopoziomowy sposób łączenia strumieni statków powietrznych.....	150
Rys. 41. Wyniki wskazujące przyrost czasu dla scenariusza nr 1 – 1L w poszczególnych wariantach...	151
Rys. 42. Dwupoziomowy sposób łączenia strumieni statków powietrznych	152
Rys. 43. Podsumowanie wyników dla scenariusza 2L.....	153
Rys. 44. Schemat ruchu statków powietrznych według procedury STAR	154
Rys. 45. Wykres pudełkowy dla scenariusza nr 3 – 3L.....	154
Rys. 46. Podsumowanie wyników dla przyjętych scenariuszy i wariantów.....	155
Rys. 47. Okno przykładowej wizualizacji z możliwością przypisania wartości parametrów	157
Rys. 48. Interfejs użytkownika biblioteki w Simio.....	158
Rys. 49. Fragment modelu w Simio przedstawiający generowane jednostki (Entity).....	159
Rys. 50. Fragment modelu przedstawiający działanie obiektów typu Server.....	159
Rys. 51. Schemat procedury STAR wraz ze skrótami dla drogi startowej RWY33 Lotniska Chopina.....	160
Rys. 52. Schemat procesu regulującego prędkości statków powietrznych.....	161
Rys. 53. Ustawienie źródła na bramach wlotowych	161
Rys. 54. Fragment danych wejściowych zaimplementowanych do modelu.....	162
Rys. 55. Schemat modelu odzwierciedlający pełną procedurę STAR.....	162
Rys. 56. Wykres kwantylowy.....	163
Rys. 57. Histogram częstości występowania obserwacji dla badanych prób	164
Rys. 58. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla badanych prób	164
Rys. 59. Fragment tabeli z wynikami symulacji.....	165
Rys. 60. Fragment tabeli z wynikami symulacji dotyczącymi uzyskanej przepustowości.....	165
Rys. 61. Histogram liczby sytuacji wymagającej korekty prędkości statków powietrznych	166
Rys. 62. Wyniki symulacji dla przyjętych scenariuszy	167
Rys. 63. Schemat typowego systemu masowej obsługi.....	169
Rys. 64. Średnie czasy trwania wybranych czynności obsługi statku powietrznego.....	176
Rys. 65. Model procesu obsługi naziemnej w Simio	179
Rys. 66. Weryfikacja modelu na przykładzie wybranych czynności obsługi naziemnej.....	182
Rys. 67. Fragment wyników symulacji modelu z zakłóceniami.....	184
Rys. 68. Fragment wyników symulacji modelu z zakłóceniami dla wariantu <i>random</i>	186
Rys. 69. Schemat istotnych momentów podczas planowania operacji startu	188
Rys. 70. Graf odzwierciedlający ruch naziemny lotniska wraz z punktami charakterystycznymi ...	191
Rys. 71. Możliwe sekwencje przedstartowe	197