

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA 9

ROZDZIAŁ 1 /➔/ PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O LINIOWYCH UKŁADACH DYNAMICZNYCH 11

1.1. DEFINICJA UKŁADU DYNAMICZNEGO	11
1.2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU O JEDNYM STOPNIU SWOBODY	12
1.2.1. Model matematyczny układu drugiego rzędu	12
1.2.2. Model matematyczny układu pierwszego rzędu	13
1.3. RUCH WŁASNY UKŁADÓW DYNAMICZNYCH	13
1.3.1. Układ pierwszego rzędu	13
1.3.2. Układ drugiego rzędu	14
1.3.2.1. Tłumiony ruch oscylacyjny układu drugiego rzędu	14
1.3.2.2. Nietłumiony ruch oscylacyjny układu drugiego rzędu	16
1.3.2.3. Ruch własny układu drugiego rzędu z tłumieniem krytycznym	17
1.3.2.4. Ruch nieoscylacyjny układu drugiego rzędu	18
1.4. RUCH WYMUSZONY UKŁADÓW DYNAMICZNYCH	19
1.4.1. Ruch wymuszony układu pierwszego rzędu	19
1.4.2. Ruch wymuszony układu drugiego rzędu	20
1.4.2.1. Przypadek $\Delta < 0$	20
1.4.2.2. Przypadek $\Delta = 0$	22
1.4.2.3. Przypadek $\Delta > 0$	22

ROZDZIAŁ 2 /➔/ METODY ROZWIĄZYWANIA RÓWNAŃ RUCHU LINIOWYCH UKŁADÓW DYNAMICZNYCH 25

2.1. ROZWIĄZANIE UKŁADU JEDNORODNYCH, LINIOWYCH RÓWNAŃ RÓŻNICZKOWYCH	25
2.2. METODY WYZNACZANIA PIERWIASTKÓW RÓWNIANIA CHARAKTERYSTYCZNEGO	28
2.2.1. Równanie charakterystyczne stopnia czwartego	28
2.2.2. Równanie charakterystyczne stopnia trzeciego	30
2.2.3. Równanie charakterystyczne stopnia drugiego i pierwszego	30
2.3. KRYTERIA STABILNOŚCI UKŁADÓW DYNAMICZNYCH	30
2.3.1. Kryterium Routha	31
2.3.2. Kryterium Hurwitza	31
2.4. PRZEKSZTAŁCENIE LAPLACE'A	36
2.5. ZASADY LINEARYZACJI RÓWNAŃ	42
2.5.1. Wzór Taylora	42
2.5.2. Wzory trygonometryczne	43

ROZDZIAŁ 3 / ➔ / MODEL MATEMATYCZNY RUCHU SAMOŁOTU 45

3.1. UKŁADY WSPÓŁRZĘDNYCH	45
3.2. TRANSFORMACJE UKŁADÓW	47
3.3. RÓWNANIA RUCHU	48
3.4. SIŁY DZIAŁAJĄCE NA SAMOŁOT	50
3.4.1. Ciąg zespołu napędowego	50
3.4.2. Siła aerodynamiczna	51
3.4.3. Ciężar samolotu	52
3.5. MOMENTY SIŁ DZIAŁAJĄCYCH NA SAMOŁOT	52
3.5.1. Moment giroskopowy	53
3.5.2. Moment od zespołu napędowego	53
3.5.3. Momenty aerodynamiczne	53

ROZDZIAŁ 4 / ➔ / PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O CHARAKTERYSTYKACH AERODYNAMICZNYCH SAMOŁOTU 55

4.1. KRYTYCZNA LICZBA MACHA	55
4.2. OPÓR AERODYNAMICZNY	56
4.2.1. Współczynnik oporu C_{x0}	57
4.2.2. Współczynnik oporu indukowanego $C_{x_{a_{ind}}}$	58
4.2.3. Biegunowa samolotu	59
4.3. SIŁA NOŚNA	60
4.4. SIŁA BOCZNA	66
4.5. MOMENT PRZECHYLAJĄCY	71
4.6. MOMENT ODCHYLAJĄCY	76
4.7. MOMENT POCHYLAJĄCY	80

ROZDZIAŁ 5 / ➔ / ROZDZIELENIE RÓWNAŃ RUCHU, WARUNKI RÓWNOWAGI W LOCIE USTALONYM 89

5.1. RÓWNANIA RUCHU PODŁUŻNEGO	89
5.2. WARUNKI RÓWNOWAGI DLA PODŁUŻNEGO RUCHU USTALONEGO	90
5.3. STATECZNOŚĆ STATYCZNA SAMOŁOTU W RUCHU PODŁUŻNYM	95
5.3.1. Stateczność statyczna przy stałej prędkości (zmiennym przeciążeniu)	96
5.3.2. Stateczność statyczna przy stałym przeciążeniu (zmiennej prędkości)	97
5.4. KRZYWA RÓWNOWAGI	101
5.5. ZAPAS STATECZNOŚCI SAMOŁOTU	105
5.6. MOMENT ZAWIASOWY	105
5.7. SIŁA NA DRAŻKU STEROWYM	108
5.8. KRZYWA RÓWNOWAGI WEDŁUG SIŁY NA DRAŻKU	108
5.9. WYCHYLENIE TRYMERA	111
5.10. STATECZNOŚĆ STATYCZNA PRZY DRAŻKU PUSZCZONYM	112

5.11. RÓWNIANIA RUCHU BOCZNEGO	113
5.12. WARUNKI RÓWNOWAGI DLA BOCZNEGO RUCHU USTALONEGO	113
5.13. STATECZNOŚĆ STATYCZNA SAMOLOTU W RUCHU BOCZNYM	115
5.13.1. Stateczność statyczna poprzeczna	115
5.13.2. Stateczność statyczna kierunkowa	117

ROZDZIAŁ 6 / ➔ / ROZWIĄZANIE ZLINEARYZOWANYCH RÓWNAŃ RUCHU PODŁUŻNEGO 119

6.1. ZAŁOŻENIA DO LINEARYZACJI RUCHU PODŁUŻNEGO	119
6.2. LINEARYZACJA SIŁY OPORU	120
6.3. LINEARYZACJA SIŁY NOŚNEJ	120
6.4. LINEARYZACJA CIĄGU	121
6.5. LINEARYZACJA AERODYNAMICZNEGO MOMENTU POCHYLAJĄCEGO	121
6.6. LINEARYZACJA MOMENTU POCHYLAJĄCEGO OD SILNIKÓW	122
6.7. LINEARYZACJA RÓWNIANIA RÓWNOWAGI SIŁ WZDŁUŻ OSI O_{x0}	122
6.8. LINEARYZACJA RÓWNIANIA RÓWNOWAGI SIŁ WZDŁUŻ OSI O_{z0}	123
6.9. LINEARYZACJA RÓWNIANIA RÓWNOWAGI MOMENTÓW POCHYLAJĄCYCH	125
6.10. LINEARYZACJA ZWIĄZKÓW KINEMATYCZNYCH	125
6.11. ZLINEARYZOWANY UKŁAD RÓWNAŃ RUCHU PODŁUŻNEGO	126
6.12. ROZWIĄZANIE SZCZEGÓLNE UKŁADU NIEJEDNORODNEGO (RSUN) – PODŁUŻNY RUCH WYMUSZONY SAMOLOTU	127
6.13. ROZWIĄZANIE OGÓLNE UKŁADU JEDNORODNEGO (ROUJ) – RUCH WŁASNY SAMOLOTU	129
6.13.1. Pominięcie wpływu zmiany wysokości na ruch własny samolotu	130
6.13.2. Analiza rozwiązań równania charakterystycznego dla ruchu podłużnego	132
6.13.3. Ruch własny krótkookresowy i długookresowy	133
6.13.3.1. Krótkookresowy ruch podłużny	134
6.13.3.2. Ruch krótkookresowy dla lotu poziomego	139
6.13.3.3. Analiza tłumienia i częstości ruchu krótkookresowego	141
6.13.3.4. Długookresowy (fugoidalny) ruch podłużny	142
6.14. ANALIZA WPŁYWU RÓŻNYCH CZYNNIKÓW NA RUCH PODŁUŻNY SAMOLOTU	151
6.14.1. Wpływ prędkości lotu	151
6.14.2. Wpływ kąta pochylenia toru lotu	155
6.14.3. Wpływ wysokości lotu	158
6.14.4. Wpływ gradientu gęstości powietrza	165
6.14.5. Wpływ zapasu stateczności	168
6.14.6. Podsumowanie	171

ROZDZIAŁ 7 / ➔ / ROZWIĄZANIE ZLINEARYZOWANYCH RÓWNAŃ RUCHU BOCZNEGO 173

7.1. ZAŁOŻENIA DO LINEARYZACJI RUCHU BOCZNEGO	173
7.2. LINEARYZACJA SIŁY BOCZNEJ	173
7.3. LINEARYZACJA MOMENTU PRZECHYLAJĄCEGO	174

7.4. LINEARYZACJA MOMENTU ODCHYLAJĄCEGO	174
7.5. LINEARYZACJA RÓWNAŃ RÓWNOWAGI SIŁ WZDŁUŻ OSI BOCZNEJ O_y	175
7.6. LINEARYZACJA RÓWNAŃ RÓWNOWAGI MOMENTÓW PRZECHYLAJĄCYCH	176
7.7. LINEARYZACJA RÓWNAŃ RÓWNOWAGI MOMENTÓW ODCHYLAJĄCYCH	177
7.8. LINEARYZACJA ZWIĄZKU KINEMATYCZNEGO	177
7.9. ZLINEARYZOWANY UKŁAD RÓWNAŃ RUCHU BOCZNEGO	177
7.10. ROZWIĄZANIE SZCZEGÓLNE UKŁADU NIEJEDNORODNEGO – BOCZNY RUCH WYMUSZONY SAMOŁOTU	178
7.11. ROZWIĄZANIE OGÓLNE UKŁADU JEDNORODNEGO – RUCH WŁASNY SAMOŁOTU	179
7.11.1. Równanie charakterystyczne	180
7.11.2. Rozwiązanie równania charakterystycznego	181
7.12. UPROSZCZONA METODA ZNAJDOWANIA PIERWIASTKÓW RÓWNAŃ CHARAKTERYSTYCZNEGO	183
7.12.1. Aperiodyczne przechylenie	183
7.12.2. Ruch spiralny	184
7.12.3. Ruch harmoniczny – holendrowanie (myszkowanie)	184
7.13. UPROSZCZONA ANALIZA PIERWSZEJ FAZY ZABURZONEGO RUCHU BOCZNEGO – HOLENDROWANIA	193
7.13.1. Równania ruchu dla holendrowania	193
7.13.2. Kąt ślizgu	195
7.13.3. Prędkość kątowna odchylenia	195
7.13.4. Prędkość kątowna przechylenia	195
7.13.5. Kąt przechylenia	197
7.13.6. Opis zjawisk fizycznych podczas holendrowania	198
7.14. UPROSZCZONA ANALIZA RUCHU SPIRALNEGO	203
7.14.1. Opis zjawisk fizycznych podczas ruchu spiralnego	203
7.14.2. Równania ruchu spiralnego	203
7.15. WPŁYW STATECZNOŚCI STATYCZNEJ POPRZECZNEJ I KIERUNKOWEJ NA STATECZNOŚĆ RUCHU BOCZNEGO	207
7.15.1. Stateczność w ruchu bocznym	208
7.15.2. Stateczność ruchu spiralnego	211
7.15.3. Stateczność ruchu bocznego dla zmiennej stateczności kierunkowej	214
7.15.4. Stateczność ruchu bocznego dla zmiennej stateczności poprzecznej	216
7.16. ANALIZA WPŁYWU RÓŻNYCH CZYNNIKÓW NA RUCH BOCZNY SAMOŁOTU	217
7.16.1. Wpływ prędkości lotu	217
7.16.2. Wpływ kąta pochylenia toru lotu	220
7.16.3. Wpływ wysokości lotu	223

DODATEK A 229

LITERATURA 249