

Autopilot: pętle wewnętrzne i zewnętrzne

Autopilot nie steruje wysokością bezpośrednio. Steruje pochyleniem, a pochyleniem zmienia tor. Kursem steruje przez przechylenie, a przechyleniem przez lotki. Ta lekcja buduje autopilota tak, jak opisuje go Pallett: wokół pętli wewnętrznych pochylenia i przechylenia, z pętlami zewnętrznymi wysokości, prędkości i kursu. Pokazuje, dlaczego wysokość i prędkość trzeba trzymać dwoma sterami naraz, po co synchronizacja przy włączeniu i automatyczny trym, i jak to wszystko wygląda w języku kaskady z automatyki.

CZAS

ok. 2 h teorii + ok.
2,5 h zadań

ZADANIA

14 zadań w treści
+ 5 do
przemyślenia, z
odpowiedziami

ŹRÓDŁA

E. H. J. Pallett, S.
Coyle, *Automatic
Flight Control*,
rozdz. 2 (s. 104–
105), 5, 6, 7, 10; A.
Tewari, rozdz.
3.6–3.8; P. H.
Zipfel, rozdz.
9.2.3

W TEJ LEKCJI

- 0 Prolog: Sperry nad Sekwaną
- 1 Budowa autopilota i hierarchia pętli
- 2 Wysokość i prędkość: dwa stery, jedna energia
- 3 Synchronizacja i automatyczny trym
- 4 Kurs przez przechylenie
- 5 Turbulencja i podejście według ILS
- 6 Metoda i przykłady rozwiązane
- 7 Błędne intuicje
- 8 Zadania do przemyślenia
- 9 Sprawdź się
- 10 Karta wzorów i co dalej

Prolog: Sperry nad Sekwaną

W 1914 roku na konkursie bezpieczeństwa lotniczego w Paryżu Lawrence Sperry przeleciał nisko nad publicznością w wodnosamolocie Curtissa z rękami w górze, a jego mechanik wyszedł na skrzydło. Samolot leciał prosto, bo trzymały go żyroskopy połączone ze sterami: pierwszy autopilot utrzymujący pochylenie i przechylenie. Wszystkie późniejsze autopiloty zachowały tę samą zasadę: najpierw utrzymać położenie samolotu, a dopiero nad tym zbudować utrzymanie wysokości, kursu i drogi.

Pytanie na start. Autopilot utrzymuje wysokość sterem wysokości, a przepustnica stoi w miejscu. Pilot każe mu wznieść się o 200 m. Co stanie się z prędkością? Odpowiedź w części 2.

Budowa autopilota i hierarchia pętli

Pallett wyróżnia w każdym układzie automatycznego sterowania lotem cztery elementy: czujniki (żyroskopy, pionowy żyroskop albo układ inercjalny, czujniki ciśnienia, odbiorniki radionawigacyjne), komputer (dawniej wzmacniacze i sumatory analogowe), serwomechanizmy wychylające stery i panel sterowania z przełącznikami trybów. Według liczby osi mówi się o utrzymywaczu skrzydeł w poziomie (jedna oś), autopilocie dwuosowym (pochylenie i przechylenie, a ster kierunku obsługuje tłumik z lekcji 8 Augmentacja stateczności: tłumik odchylenia i pochylenia) i trzyosowym.

Struktura sterowania to kaskada z lekcji 3.2 Strojenie: model z testu, reguły nastaw i regulacja kaskadowa, ta sama co w dronie z części I automatyki:

🔧 HIERARCHIA PĘTLI AUTOPILOTA

Pętle wewnętrzne (pasmo rzędu 1–5 rad/s): tłumiki (lekcja 8), utrzymanie pochylenia θ (ster wysokości) i przechylenia φ (lotki).

Pętle zewnętrzne (pasmo 0,1–0,5 rad/s): wysokość lub prędkość pionowa $\rightarrow$ zadane θ ; kurs $\rightarrow$ zadane φ ; prędkość $\rightarrow$ przepustnica (automat ciągu) albo zadane θ ; ścieżka ILS, VOR $\rightarrow$ zadane θ i φ .

Przykład pętli pochylenia: $\delta_e = K_\theta(\theta - \theta_{\text{zad}}) + K_q q$, z $K_\theta = 1,5$, $K_q = 0,4$ s dla samolotu z lekcji 5 (znak: $\delta > 0$ to ster w dół).

Dlaczego kaskada? Pętla wewnętrzna jest szybka i „prostuje” samolot: z punktu widzenia pętli zewnętrznej samolot staje się prostym urządzeniem, które ustawia zadane pochylenie z opóźnieniem ok. sekundy. Pętla zewnętrzna może być wtedy wolna i prosta, a ograniczenie zadanego pochylenia (np. od -10° do $+15^\circ$) automatycznie ogranicza manewry. Pętla pochylenia z naszymi wzmocnieniami ma bieguny $-6,7 \pm 2,2i$, $-1,4$ i $-0,06/s$. Ten ostatni, bardzo wolny, to

pozostałość fugoidy: przy utrzymanym pochyleniu prędkość wciąż może powoli dryfować. Zajmie się nią pętla prędkości.

ZADANIA · CZĘŚĆ 1

3 zadania · ok. 20 min

- 1 Pętla pochylenia ma wzmacnienie $K_\theta = 1,5$. O ile stopni wychyli się ster, gdy pochylenie różni się od zadanego o 2° i samolot się nie obraca?
- 2 Dlaczego pętla wysokości nie może wychylać steru wysokości bezpośrednio, z pominięciem pętli pochylenia? Co by się stało przy dużym wzmacnieniu?
- 3 Pallett mówi, że sam czujnik pochylenia nie utrzyma wysokości. Dlaczego? Jaki czujnik dodaje się w pętli wysokości?

▀▀▀ podstawowe ▀▀▀ średnie ▀▀▀ feynmanowskie

2 Wysokość i prędkość: dwa stery, jedna energia

Pętla wysokości zamienia błąd wysokości na zadane pochylenie, z członem tłumiącym od prędkości pionowej:

$$\theta_{\text{zad}} = K_h(h_{\text{zad}} - h) - K_{\dot{h}}\dot{h}, \quad K_h = 0,003 \text{ rad/m}, \quad K_{\dot{h}} = 0,01 \text{ rad/(m/s)}.$$

Z lekcji 5 Lot w płaszczyźnie symetrii: model podłużny i pochodne stateczności wiemy jednak, że w stanie ustalonym ster wysokości ustala kąt natarcia, czyli prędkość, a kąt toru zależy od nadmiaru ciągu. Wznoszenie wymaga energii: $mg\Delta h$. Jeśli silnik jej nie dostarczy, autopilot weźmie ją z energii kinetycznej. Odpowiedź na pytanie z prologu: samolot zwolni. W symulacji, przy poleceniu $+50 \text{ m}$ i stałym ciągu, prędkość spada o $5,4 \text{ m/s}$, a po dwóch minutach samolot wciąż jest 2 m poniżej zadanej wysokości i $1,4 \text{ m/s}$ wolniejszy. Przy poleceniu $+200 \text{ m}$ spadek prędkości byłby niebezpieczny.

🔧 PODZIAŁ ZADAŃ: TRYBY WYSOKOŚCI I PRĘDKOŚCI

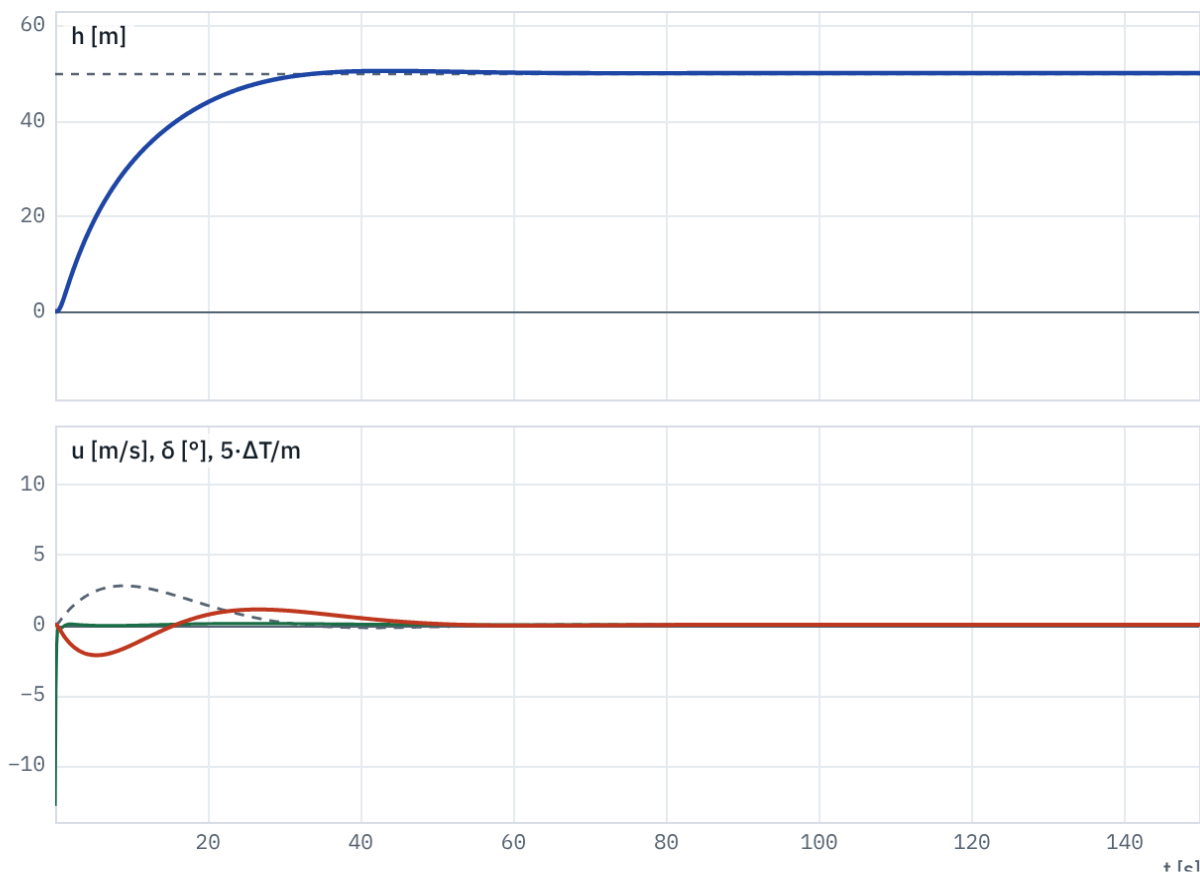
ALT z automatem ciągu: ster wysokości trzyma wysokość, przepustnica prędkość,
 $\Delta T/m = K_u(u_{\text{zad}} - u) + K_{iu} \int (u_{\text{zad}} - u) dt.$

Zmiana poziomu lotu: przepustnica ustawia stały ciąg wznoszenia (energia), ster wysokości trzyma prędkość, $\theta_{\text{zad}} \propto u$; przy zadanej wysokości przejście w ALT.

Bilans energii: $\dot{E}/(mg) = \dot{h} + \frac{U}{g}\dot{u} \approx \frac{(T-D)U}{mg}.$

Drugi tryb jest dokładnie tym, co robią autopiloty samolotów pasażerskich przy zmianie poziomu lotu: silnik na mocy wznoszenia, prędkość na sterze wysokości. Pallett opisuje oba warianty: utrzymanie prędkości przez przepustnicę i przez pochylenie. Nowoczesne układy (np. TECS, ang. *total energy control system*) formalizują ten podział: przepustnica steruje całkowitą energią, ster wysokości jej rozdziałem między wysokość i prędkość.

SYMULACJA 1 Panel trybów autopilota na samolocie z lekcji 5. Zadać zmianę wysokości i porównaj trzy tryby: ALT z automatem ciągu, ALT ze stałym ciągiem i zmianę poziomu lotu (stały ciąg wznoszenia, prędkość sterem wysokości). Dodaj turbulencję pionową.



— wysokość względna h [m] — zmiana prędkości u [m/s] — ster wysokości δ [°]
 — nadmiar ciągu $\Delta T/m$ [m/s²]

h po 150 s 50,0 m

czas do wejścia w pas $\pm 5\%$ (co najmniej $\pm 2,5$ m) 26 s

największy spadek prędkości -2,17 m/s

u po 150 s 0,00 m/s

największe wychylenie steru 12,9°

Wysokość trzyma ster wysokości (przez pętlę pochylenia), prędkość automat ciągu. Energię na wznoszenie dostarcza silnik, więc prędkość spada tylko chwilowo.

Stan na rysunku: model z przykładu 3.3 Tewariego (55 m/s) ze sterowaniem z lekcji 5; pętla pochylenia $\delta = 1,5 \cdot (\theta - \theta_{\text{zad}}) + 0,4 \cdot q$; ALT: $\theta_{\text{zad}} = 0,003 \cdot (h_{\text{zad}} - h) - 0,01 \cdot \dot{h}$; automat ciągu PI na prędkości; turbulencja pionowa $\sigma = 0,0$ m/s (filtr pierwszego rzędu, skala 300 m).

- 1 Ile energii potrzeba, żeby samolot o masie 1100 kg wzniósł się o 200 m? O ile spadłaby prędkość z 55 m/s, gdyby całą tę energię wziąć z energii kinetycznej?
- 2 Automat ciągu daje maksymalnie $\Delta T/m = 0,55 \text{ m/s}^2$ przy wznoszeniu o 50 m. Jaka prędkość wznoszenia to umożliwia przy stałej prędkości lotu?
- 3 W trybie zmiany poziomu lotu $\theta_{\text{zad}} = 0,08 \text{ u}$. Wyjaśnij, dlaczego dodatni współczynnik daje stabilną pętlę prędkości (gdy samolot zwalnia, $u < 0$).

▣▣▣ podstawowe ▣▣▣ średnie ▣▣▣ feynmanowskie

3 Synchronizacja i automatyczny trym

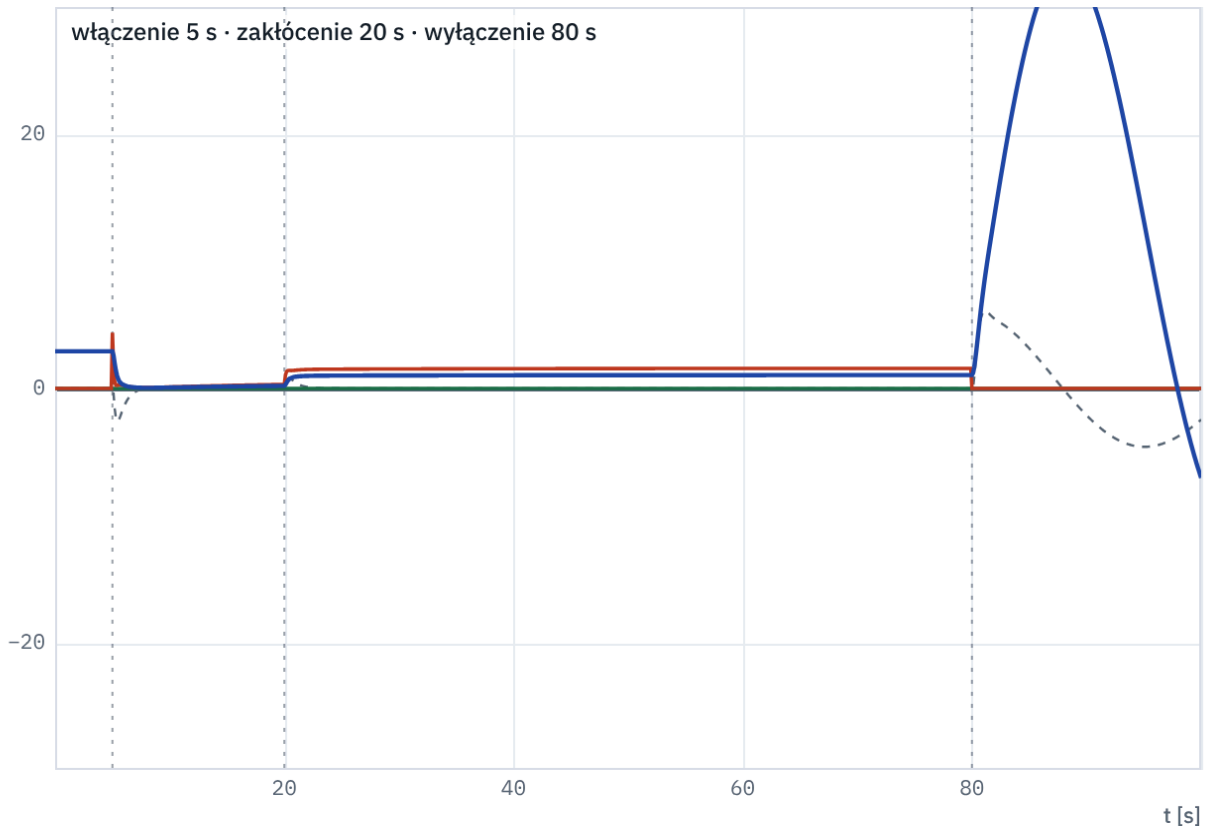
Dwa problemy, które w teorii sterowania wyglądają na detale, w kokpicie są sprawą bezpieczeństwa. Oba opisuje Pallett.

Synchronizacja przy włączeniu. Czujnik pochylenia działa cały czas, także przed włączeniem autopilota. Jeśli samolot wznosi się z nosem w górę, a autopilot ma za odniesienie lot poziomy, to w chwili włączenia jego sygnał każe od razu opuścić nos: ster zostaje „wyrwany” z położenia trymu (Pallett: *snatching*). Rozwiązanie: przed włączeniem sygnał błędu jest zerowany, czyli odniesienie ustawia się na bieżące położenie, a serwo w położeniu bieżącego steru. To jest przełączanie bezuderzeniowe z lekcji 3.3 Nieliniowa rzeczywistość: nasycenie, windup, feedforward i gain scheduling. W symulacji: bez synchronizacji ster skacze o $4,4^\circ$, a przeciążenie spada o 0,26 g; z synchronizacją nic się nie dzieje.

Automatyczny trym. Gdy coś zmienia równowagę momentów (zużycie paliwa, przejście pasażerów, zmiana prędkości), autopilot kompensuje to stałym wychyleniem steru. Serwo trzyma obciążenie, a pilot o tym nie wie. Gdy autopilot się wyłączy (albo zostanie wyłączony przy awarii), ster wraca do położenia z drążka i samolot dostaje nagłe zaburzenie. Dlatego autopilot ma osobne serwo trymu, które powoli przestawia klapkę wyważającą albo statecznik tak, żeby średnie wychylenie serwa steru było zerowe. To jest człon całkujący, który „odciąża” pętlę proporcjonalną, jak całka w regulatorze PI, tylko wykonana innym elementem wykonawczym. W symulacji: zakłócenie wymaga ok. 1° steru; bez automatycznego trymu samolot po wyłączeniu autopilota zmienia pochylenie o ok. 21° w 20 s, z automatycznym trymem o kilka setnych stopnia.

SYMULACJA 2

Samolot wznosi się z nosem w górę o $2,9^\circ$. Autopilot pochylenia włącza się w 5. sekundzie, w 20. sekundzie pojawia się stały moment zakłócający, w 80. sekundzie autopilot się wyłącza. Włącz synchronizację i automatyczny trym i porównaj wychylenie serwa, trymu i pochylenie.



skok steru przy włączeniu $4,38^\circ$

przyrost przeciążenia po włączeniu $-0,259 \dots 0,076$ g

serwo tuż przed wyłączeniem $1,58^\circ$

zmiana pochylenia w 20 s po wyłączeniu $32,4^\circ$

Bez synchronizacji autopilot przy włączeniu „szarpie” sterem: chce od razu przywrócić pochylenie odniesienia, a samolot jest w innym. Pallett: ster jest wrywany z położenia trymu.

Stan na rysunku: samolot wznosi się z $\theta \approx 2,9^\circ$; autopilot pochylenia $\delta_s = 1,5 \cdot (\theta - \theta_{ref}) + 0,4 \cdot q$ włączony od 5 do 80 s; $\theta_{ref} = 0$ (odniesienie stałe); trym nieruchomy; zakłócenie $0,50 \text{ 1/s}^2$ od 20 s.

ZADANIA · CZĘŚĆ 3

3 zadania · ok. 20 min

- 1 Bez synchronizacji ster skacze o $1,5 \cdot \theta_0$ przy włączeniu. Policz skok dla $\theta_0 = 2,9^\circ$ i oszacuj przyrost przyspieszenia kąowego $\Delta \dot{q} = M_\delta \Delta \delta$ ($M_\delta = -25/\text{s}^2$).

- 2 Zakłócenie wymaga stałego momentu, który daje ster wychylony o $1,13^\circ$ ($\Delta M/J_y = 0,5/s^2$). Pętla pochylenia jest proporcjonalna, $K_\theta = 1,5$. Jaki błąd pochylenia zostanie bez automatycznego trymu?

- 3 Automatyczny trym działa wolno: $\dot{\delta}_t = 0,2 \delta_s$. Dlaczego nie robi się go szybkim?

▣▣▣ podstawowe ▣▣▣ średnie ▣▣▣ feynmanowskie

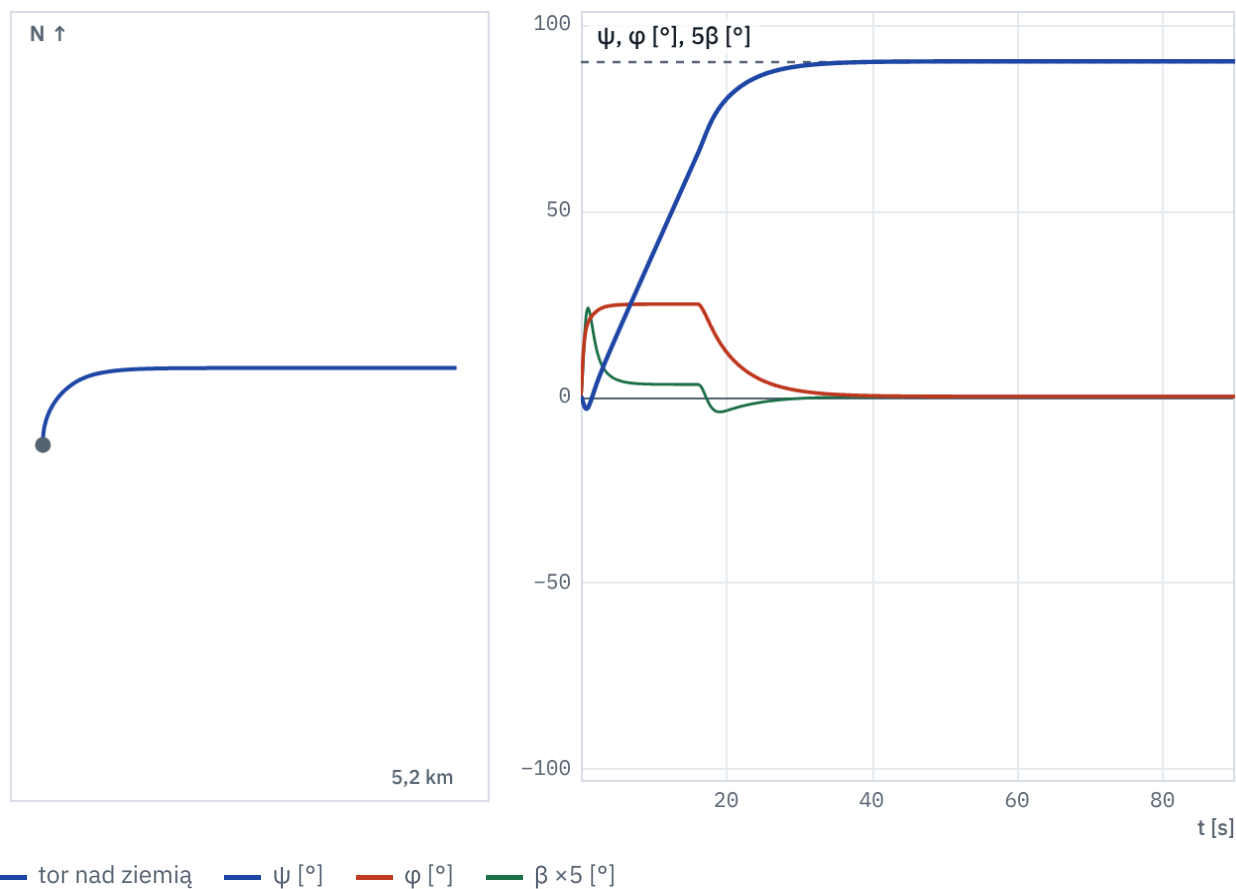
4 Kurs przez przechylenie

Kurs zmienia się tylko wtedy, gdy samolot jest przechylony: w zakręcie skoordynowanym $\dot{\psi} = g \tan \varphi / U$. Pętla zewnętrzna zamienia błąd kursu na zadane przechylenie z ograniczeniem, pętla wewnętrzna wychyla lotki, a tłumik odchylenia z lekcji 8 dba o holendrowanie:

$$\varphi_{\text{zad}} = \text{sat}_{\pm\varphi_{\text{max}}} (K_\psi(\psi_{\text{zad}} - \psi)), \quad \delta_a = K_\varphi(\varphi_{\text{zad}} - \varphi) - K_p p.$$

Przy dużym błędzie kursu przechylenie stoi na ograniczeniu (np. 25°) i samolot zakręca ze stałą prędkością $\dot{\psi} = 4,8^\circ/s$, po okręgu o promieniu 660 m. Gdy błąd maleje, przechylenie maleje proporcjonalnie i samolot łagodnie wychodzi na nowy kurs. W symulacji zmiana kursu o 90° zajmuje 28 s do pasa $\pm 2^\circ$, bez przestrzału. Pallett opisuje dodatkowo przechwytywanie radiali VOR i sygnałów nawigacyjnych: to kolejna pętla nad pętlą kursu.

SYMULACJA 3 Zmiana kursu: tor nad ziemią (północ w górę) i przebiegi kursu, przechylenia i ślizgu. Zmieniaj zadaną zmianę kursu, ograniczenie przechylenia i wzmocnienie pętli kursu.



czas do $\pm 2^\circ$ od zadanego kursu 28,0 s

przebieg kursu 0,0°

największe przechylenie 24,8°

największy ślizg 4,74°

prędkość zakrętu przy ograniczeniu 4,77 °/s

Pętla zewnętrzna zamienia błąd kursu na zadane przechylenie (z ograniczeniem), pętla wewnętrzna wychyla lotki, a tłumik odchylenia z washout gasi holendrowanie. Większą część zakrętu samolot leci z przechyleniem z ograniczenia, ze stałą prędkością zakrętu.

Stan na rysunku: $\varphi_{\text{zad}} = 1,0 \cdot (\psi_{\text{zad}} - \psi)$, ograniczone do $\pm 25^\circ$; $\delta_a = 1,0 \cdot (\varphi_{\text{zad}} - \varphi) - 0,2 \cdot p$; tłumik $\delta_r = 0,5 \cdot r$ z washout 2 s; samolot z lekcji 7 przy 55 m/s.

ZADANIA · CZĘŚĆ 4

3 zadania · ok. 20 min

- 1 Ile trwa zmiana kursu o 180° z przechyleniem 25° przy 55 m/s (bez wejścia i wyjścia)?
Jaka jest średnica zakrętu?

- 2 Przy $K_\psi = 1$ błąd kursu 10° daje zadane przechylenie 10° . Pokaż, że w końcowej fazie kurs zbliża się do zadanego wykładniczo i policz stałą czasową (przyjmij, że przechylenie nadąża za zadanym).

- 3 Dlaczego ograniczenie przechylenia jest w autopilocie zwykle $25\text{--}30^\circ$, choć samolot bez trudu zakręciłby z 45° ?

▣▣ podstawowe ▣▣▣ średnie ▣▣▣▣ feynmanowskie

5 Turbulencja i podejście według ILS

Turbulencję modeluje się jako szum przepuszczony przez filtr kształtujący (o białym szumie i jego gęstości widmowej w lekcji 4.4 Filtr Kalmana): standardowe modele Drydena i von Kármána podają widma podmuchów zależne od skali turbulencji i prędkości lotu. W symulacji 1 używamy najprostszej wersji, filtru pierwszego rzędu ze skalą 300 m. Podmuch pionowy wchodzi do modelu jak zmiana kąta natarcia o w_g/U (lekcja 5, zadanie 8.3). Autopilot ma wtedy wybór: trzymać wysokość ciasno i poruszać sterem przy każdym podmuchu (męczące dla pasażerów i serw) albo luźno i pozwolić samolotowi „pływać” o kilka metrów.

Podejście według ILS to śledzenie wiązek radiowych: kierunku (lokalizer) i ścieżki schodzenia. Sygnał to odchylenie kątowe od wiązki, więc ta sama odległość od osi daje tym większy sygnał, im bliżej pasa jest samolot: wzmocnienie pętli rośnie samo z siebie. Autopilot musi więc zmniejszać swoje wzmocnienie wraz ze zbliżaniem się do progu (programowanie w funkcji wysokości z radiowysokościomierza albo czasu), inaczej tuż przed pasem pętla wpadnie w oscylacje. Pallett opisuje te układy w rozdziale 6, a automatyczne lądowanie i automat ciągu w rozdziale 10.

⚠ RAMKA: JAK TO ROBI TEWARI

Tewari projektuje utrzymanie wysokości i prędkości jako jeden regulator wielowymiarowy: LQR (lekcja 4.3 LQR: koszt zamiast biegunów) na stanie $(u, \alpha, \theta, q, h)$ z całkami błędów wysokości i prędkości, sterujący jednocześnie sterem i przepustnicą, plus obserwator (filtr Kalmana) dla niemierzonych stanów. Kaskada Palletta i LQR prowadzą do podobnych zachowań; LQR robi podział „ster-przepustnica” automatycznie z wag macierzy Q i R , kaskada wymaga go od projektanta. W praktyce autopilotów certyfikowanych przeważają kaskady z jasno określonymi trybami, bo każdy tryb można osobno przetestować i wyjaśnić pilotowi.

1 Ścieżka schodzenia ma 3° . Samolot jest 10 m pod ścieżką w odległości 6 km od punktu przyziemienia, a potem 10 m pod ścieżką w odległości 600 m. Ile wynosi odchylenie kątowe w obu przypadkach?

2 W symulacji 1 włącz turbulencję $\sigma = 1$ m/s w trybie ALT z automatem ciągu. Jak zmienić wzmocnienia, żeby samolot mniej „szarpał” sterem, i jaka jest cena?

▮▮▮ podstawowe ▮▮▮ średnie ▮▮▮ feynmanowskie

☰ METODA: PROJEKT AUTOPILOTA

1. **Tłumiki** (lekcja 8), jeśli mody są za słabo tłumione.
2. **Pętle wewnętrzne** θ i φ : pasmo kilka razy mniejsze od pasma serw, z ograniczeniami wychyleń.
3. **Pętle zewnętrzne** wysokości, kursu, prędkości: pasmo 5–10 razy mniejsze od wewnętrznych; ograniczenia zadanych θ , φ .
4. **Podział energii**: kto trzyma prędkość, kto tor (automat ciągu albo tryb zmiany poziomu lotu).
5. **Logika**: synchronizacja przy włączeniu, przechwytywanie (przejścia między trybami), automatyczny trym, monitorowanie i wyłączanie przy awarii.

Przykład 6.1

Wznoszenie o 50 m z automatem ciągu i bez

Porównaj w modelu zmianę wysokości o +50 m w trybie ALT z automatem ciągu i ze stałym ciągiem.

1. Z automatem ciągu: największe pochylenie $6,4^\circ$, ster do $12,9^\circ$, przepustnica do $\Delta T/m = 0,55 \text{ m/s}^2$; prędkość spada najwyżej o 2,2 m/s; po 30 s $h = 49,0 \text{ m}$, potem praktycznie bez przestrzału (0,1 m).
2. Stały ciąg: po 30 s $h = 41,4 \text{ m}$, po 120 s 47,7 m; prędkość spada o 5,4 m/s i po dwóch minutach jest wciąż 1,4 m/s mniejsza.

Wynik: bez automatu ciągu wznoszenie jest okupione prędkością, a wysokość dochodzi powoli.

Sprawdzenie energii: $\Delta h = 47,7 \text{ m}$ przy $\Delta u = -1,4 \text{ m/s}$: energia potencjalna +468 J/kg, kinetyczna –76 J/kg; resztę dostarczyła zmiana oporu przy mniejszej prędkości (lekcja 5: przy 55 m/s wolniej to mniejszy opór) ✓.

Przykład 6.2

Włączenie autopilota we wznoszeniu

Samolot wznosi się z pochyleniem $2,9^\circ$ i jest wytrimowany ($\delta = 0$). Autopilot pochylenia z odniesieniem $\theta_{\text{ref}} = 0$ włącza się bez synchronizacji. Co się dzieje?

- 1 W chwili włączenia $\delta = K_\theta(\theta - \theta_{\text{ref}}) = 1,5 \cdot 2,9^\circ = 4,4^\circ$: ster w dół.
- 2 Przeciążenie spada w ciągu sekundy o $0,26\text{ g}$; po 5 s pochylenie wynosi $0,07^\circ$ i samolot przechodzi do lotu z nadmiarem ciągu przy $\theta \approx 0$, czyli przyspiesza.
- 3 Z synchronizacją: $\theta_{\text{ref}} = 2,9^\circ$, ster się nie rusza, wznoszenie trwa dalej.

Wynik: brak synchronizacji to szarpnięcie i zmiana trajektorii, której pilot nie chciał.

Sprawdzenie: Pallett opisuje dokładnie ten przypadek: samolot wznoszący się, sygnał pochylenia każe „ster w dół”, a po włączeniu samolot zmienia pochylenie ✓.

Przykład 6.3

Zmiana kursu o 90°

Pętla kursu $K_\psi = 1$, ograniczenie przechylenia 25° , tłumik odchylenia z washout. Oszacuj czas zmiany kursu i porównaj z symulacją.

- 1 Faza na ograniczeniu: od 90° do 25° błędu (bo $K_\psi \cdot 25^\circ = 25^\circ$), czyli 65° z prędkością $4,8^\circ/\text{s}$: ok. 14 s , plus ok. 2 s wejścia w przechylenie.
- 2 Faza wykładnicza ze stałą czasową $5,6\text{ s}$ (zadanie 4.2): od 25° do 2° błędu to $5,6 \ln(12,5) = 14\text{ s}$.
- 3 Razem ok. 30 s ; symulacja daje 28 s . Faza na ograniczeniu trwa w symulacji tyle, ile w szacunku (do 16 s), a krótsza jest faza końcowa (ok. 12 s zamiast 14 s): pętla przechylenia nie nadąża natychmiast za zadaniem przechyleniem, a prędkość odchylenia na chwilę przekracza wartość ustaloną.

Wynik: ok. $28\text{--}30\text{ s}$, bez przestrzału, z największym przechyleniem $24,8^\circ$.

Sprawdzenie: największy ślizg w symulacji $4,7^\circ$: tłumik nie koordynuje zakrętu (lekcja 8, przykład 6.2); dodanie sprzężenia od ślizgu zmniejszyłoby go ✓.

Błędne intuicje, których trzeba się oduczyć

- × **„Autopilot steruje wysokością sterem wysokości, a prędkością przepustnicą, i to wszystko.”**

To jeden z dwóch możliwych podziałów. W trybie zmiany poziomu lotu jest odwrotnie: przepustnica daje energię, ster trzyma prędkość. Wybór zależy od fazy lotu i od tego, który błąd jest groźniejszy.

- × **„Autopilot zawsze lata lepiej niż pilot.”**

Lata dokładniej w warunkach, do których go zaprojektowano. Poza nimi (awaria czujnika, oblodzenie, nasycenie sterów) potrafi długo i po cichu kompensować problem, aż przestanie wystarczać; dlatego istnieją sygnalizacje braku trymu i automatyczne wyłączanie.

- × **„Przy włączeniu autopilot po prostu przejmuje stery.”**

Musi najpierw zsynchronizować odniesienia z bieżącym stanem, inaczej szarpnie. To przełączanie bezuderzeniowe z automatyki.

- × **„Automatyczny trym to wygoda.”**

To bezpieczeństwo: bez niego wyłączenie autopilota oddaje pilotowi samolot rozstrojony o tyle, ile autopilot po cichu kompensował.

- × **„Szybsza pętla zewnętrzna da lepsze utrzymanie wysokości.”**

Tylko do pewnej granicy: pętla zewnętrzna musi być wyraźnie wolniejsza od wewnętrznej, inaczej kaskada traci sens i zapasy stateczności.

Zadania do przemyślenia

Te zadania wymagają więcej myślenia niż liczenia.

ZADANIA DO PRZEMYŚLENIA

5 zadań · ok. 1,5 godziny

- 1 **Druga strona krzywej oporu.** Samolot podchodzi do lądowania wolniej niż prędkość najmniejszego oporu. Autopilot trzyma ścieżkę sterem wysokości przy stałym ciągu. Samolot znajduje się nieco pod ścieżką; autopilot podnosi nos. Co dalej?

- 2 **Przechwytywanie wysokości.** Autopilot wznosi się w trybie zmiany poziomu lotu z 5 m/s, a zadana wysokość to 3000 m. Kiedy powinien przejść w ALT, żeby nie przestrzelić, i dlaczego przejście nie może nastąpić dopiero na 3000 m?
- 3 **Kaskada w dronie i w samolocie.** Porównaj kaskadę drona z części I automatyki (prędkość kątowna → kąt → prędkość → pozycja) z kaskadą autopilota. Co odpowiada czemu i czym się różnią?
- 4 **Ukryty problem.** Samolot zbiera lód na skrzydłach, a autopilot trzyma wysokość i prędkość. Co widzi pilot przez pierwsze minuty i czym to grozi?
- 5 **Projekt LQR kontra kaskada.** W ramce Tewariego LQR steruje sterem i przepustnicą jednocześnie. Jak w LQR ustawić, że wysokość ma być trzymana ciasno, a prędkość luźno, i co odpowiada temu w kaskadzie?

▯▯▯ podstawowe ▯▯▯ średnie ▯▯▯ feynmanowskie

9 Sprawdź się

Odpowiedz w myślach, zanim rozwiniesz odpowiedź.

- 1 **Z jakich elementów składa się autopilot według Palletta?**
Czujniki, komputer, serwomechanizmy, panel sterowania (tryby).
- 2 **Jakie są pętle wewnętrzne, a jakie zewnętrzne?**
Wewnętrzne: tłumiki, pochylenie, przechylenie. Zewnętrzne: wysokość, prędkość pionowa, kurs, prędkość, ścieżki nawigacyjne.
- 3 **Dlaczego do trzymania wysokości potrzebny jest też automat ciągu?**
Wznoszenie wymaga energii; bez dodatkowego ciągu autopilot bierze ją z prędkości.
- 4 **Po co synchronizacja przy włączeniu?**
Żeby autopilot przejął stery bez szarpnięcia: odniesienie = bieżące położenie, serwo = bieżące wychylenie (przełączanie bezuderzeniowe).

5 Co robi automatyczny trym?

Powoli przejmuje stałe wychylenie serwa steru (człon całkujący), tak że po wyłączeniu autopilota samolot jest wytrimowany.

6 Jak autopilot zmienia kurs?

Błąd kursu → zadane przechylenie (z ograniczeniem) → lotki; tłumik odchylenia gasi holendrowanie.

PĘTLE PODŁUŻNE

$$\delta_e = K_\theta(\theta - \theta_{\text{zad}}) + K_q q$$

$$\theta_{\text{zad}} = K_h(h_{\text{zad}} - h) - K_{\dot{h}} \dot{h}, \dot{h} = U(\theta - \alpha)$$

$$\Delta T/m = K_u(u_{\text{zad}} - u) + K_{iu} \int (u_{\text{zad}} - u)$$

$$\text{energia: } \dot{h} + \frac{U}{g} \dot{u} \approx \frac{(T-D)U}{mg}$$

PĘTLE BOCZNE I LOGIKA

$$\varphi_{\text{zad}} = \text{sat}(K_\psi(\psi_{\text{zad}} - \psi)), \dot{\psi} = g \tan \varphi / U$$

$$\text{stała czasowa pętli kursu} \approx U/(gK_\psi)$$

synchronizacja: $\theta_{\text{ref}} := \theta$, serwo := δ przy włączeniu

automatyczny trym: $\dot{\delta}_t = k_t \delta_s$, k_t małe

Do przeczytania

- **Obowiązkowo:** E. H. J. Pallett, S. Coyle, *Automatic Flight Control*, rozdz. 2 (s. 104–105, trym i synchronizacja), 5 (synchronizacja w układach) i 6 (tryby: wysokość, prędkość, kurs, ILS, VOR); rozdz. 10 (automat ciągu i automatyczne lądowanie).
- **Dla chętnych:** A. Tewari, rozdz. 3.6–3.8 (autopilot jako LQR i LQG); P. H. Zipfel, rozdz. 9.2.3 (struktura autopilota w symulacji).

Wszystkie dotychczasowe lekcje korzystały z modeli liniowych, rozdzielonych na ruch podłużny i boczny. Ostatnia lekcja części o samolocie składa wszystko w jedną symulację nieliniową sześciu stopni swobody: kwaterniony z lekcji 1, bryłę z lekcji 2, aerodynamikę z lekcji 4–7 i autopilota z tej lekcji, i sprawdza, kiedy modele liniowe przestają wystarczać.



Odpowiedzi

Zadania · część 1

1. $1,5 \cdot 2^\circ = 3^\circ$. Znak: pochylenie za duże ($\theta > \theta_{\text{zad}}$) daje $\delta > 0$, ster w dół, nos w dół.
2. Od steru do wysokości są trzy całkowania i dwa mody (krótkookresowa, fugoida): przesunięcie fazy jest duże. Pętla z dużym wzmocnieniem szybko traci zapas fazy (lekcja 2.4 automatyki) i zaczyna oscylować. Pętla pochylenia usuwa część tej dynamiki: z zewnątrz zostaje prawie tylko cała z pochylenia do wysokości ($\dot{h} \approx U(\theta - \alpha)$).
3. Zaburzenie, które przesunie samolot w pionie bez zmiany pochylenia (np. pionowy podmuch, zmiana ciągu), nie wywoła żadnej reakcji pętli pochylenia: samolot polecie poziomo na innej wysokości. Potrzebny jest czujnik wysokości: puszka aneroidowa (barometr) albo sygnał wysokości z układu inercyjnego i centrali aerometrycznej.

Zadania · część 2

1. $mg\Delta h = 1100 \cdot 9,81 \cdot 200 = 2,16 \text{ MJ}$. $\frac{1}{2}m(55^2 - V^2) = 2,16 \text{ MJ}$, więc $V^2 = 3025 - 3924 < 0$: energii kinetycznej nie starczy. Samolot przeciągnąłby się dużo wcześniej (prędkość przeciągnięcia ok. 27 m/s). Wznoszenie o 200 m musi zasilić silnik.
2. $\dot{h} = \frac{\Delta T U}{mg} = \frac{0,55 \cdot 55}{9,81} = 3,1 \text{ m/s}$. Na 50 m to ok. 16 s samego wznoszenia, w symulacji samolot wchodzi w pas $\pm 2,5 \text{ m}$ po ok. 26 s.
3. Przy $u < 0$ zadane pochylenie maleje: nos w dół, część energii potencjalnej wraca w prędkość. Przy $u > 0$ nos w górę i nadmiar prędkości zamienia się w wysokość. To ujemne sprzężenie zwrotne przez wymianę energii, bez ruszania przepustnicy.

Zadania · część 3

1. $\Delta\delta = 4,4^\circ = 0,076 \text{ rad}$; $\Delta\dot{q} = -25 \cdot 0,076 = -1,9 \text{ rad/s}^2$: gwałtowne pochylenie nosem w dół, które pasażerowie poczują jako „dziurę”.
2. Pierwsze przybliżenie: ster z pętli musi dać $1,13^\circ$, więc $\Delta\theta = 1,13^\circ / 1,5 = 0,75^\circ$. Dokładniej: przy zmienionym pochyleniu zmienia się też kąt natarcia, a stateczność statyczna (M_α) sama równoważy część zakłócającego momentu. Serwo potrzebuje wtedy tylko $1,02^\circ$, a błąd pochylenia wynosi $0,68^\circ$ (symulacja). Człon całkujący (automatyczny trym) usuwa ten błąd.
3. Szybki trym reagowałby na krótkie wychylenia (manewry, turbulencja), a trymer ma duży autorytet i powolny napęd: zacząłby oscylować razem z pętlą steru albo zostawiałby samolot rozstrojony po każdym manewrze. Ma odciążać tylko składową stałą, więc jego pasmo musi być wyraźnie poniżej pasma pętli pochylenia. Do tego awaria szybkiego trymu (ucieczka trymera) byłaby groźna.

Zadania · część 4

1. $\dot{\psi} = 9,81 \tan 25^\circ / 55 = 0,083 \text{ rad/s}$, $\pi / 0,083 = 38 \text{ s}$. Promień $U / \dot{\psi} = 661 \text{ m}$, średnica 1,3 km.
2. $\dot{\psi} = \frac{g}{U} \tan \varphi \approx \frac{g}{U} K_\psi (\psi_{\text{zad}} - \psi)$: równanie pierwszego rzędu ze stałą czasową $\frac{U}{gK_\psi} = 5,6 \text{ s}$. Pasma pętli kursu to ok. 0,18 rad/s, wyraźnie wolniej niż pętla przechylenia.
3. Komfort pasażerów (przeciążenie $1 / \cos \varphi$: 1,10 przy 25° , 1,41 przy 45°), zapas do przeciągnięcia (prędkość przeciągnięcia rośnie jak $\sqrt{n}$) i to, że pilot ma od razu widzieć, że coś jest nie tak, jeśli

przechylenie przekroczy normę. Autopilot ma latać łagodnie, a nie najszybciej.

Zadania · część 5

1. $10/6000 = 0,0017 \text{ rad} = 0,1^\circ$ i $10/600 = 0,017 \text{ rad} = 1^\circ$. Ten sam błąd liniowy daje 10 razy większy sygnał: pętla o stałym wzmacnieniu kątowym jest blisko pasa 10 razy „sztywniejsza”.
2. Mniejsze K_h i $K_{\dot{h}}$ (i ewentualnie filtr na sygnale wysokości) zmniejszą ruchy steru, ale wysokość będzie bardziej pływać i polecenia będą realizowane wolniej. To ten sam kompromis co w lekcji 2.5 automatyki (funkcje S i T): szybka odpowiedź kontra przenoszenie szumu i zakłóceń.

Zadania do przemyślenia

1. Podniesienie nosa zmniejsza prędkość, a poniżej prędkości najmniejszego oporu wolniej znaczy większy opór. Samolot traci energię jeszcze szybciej i schodzi poniżej ścieżki mimo nosa w górę.
2. Pętla „ścieżka sterem wysokości” zmienia znak efektu: autopilot ciągnie coraz mocniej, aż do przeciągnięcia. Dlatego przy podejściu autopiloty trzymają prędkość przepustnicą (przy automatycznym lądowaniu automat ciągu jest zwykle wymagany; przy podejściu z ręczną przepustnicą prędkości pilnuje pilot), a ścieżkę sterem wysokości.
2. 1. Wyrównanie wymaga zmiany toru z $\dot{h} = 5 \text{ m/s}$ do zera; przy dopuszczalnym przyspieszeniu pionowym np. $0,05 g$ to ok. 10 s i ok. 25 m wysokości. Przechwytywanie zaczyna się więc ok. $25\text{--}50 \text{ m}$ przed celem i zwykle zależy od bieżącej prędkości pionowej.
2. Przejście dokładnie na 3000 m oznacza przestrzał o kilkadziesiąt metrów albo gwałtowne wyrównanie. To przykład logiki przejść między trybami, której liniowa analiza nie obejmuje.
3. 1. Prędkość kątowa $\rightarrow$ tłumiki; kąt $\rightarrow$ pętla θ, φ ; prędkość $\rightarrow$ pętla prędkości pionowej lub prędkości lotu; pozycja $\rightarrow$ wysokość, kurs, tor.
2. Różnice: dron siłą pionową dostaje wprost z ciągu, samolot z siły nośnej, czyli z prędkości i kąta natarcia, więc wysokość i prędkość są sprzężone przez energię. Kurs drona nie wymaga przechylenia, samolotu tak. Samolot ma też naturalną stateczność, dron prawie żadnej.
4. 1. Łód zwiększa opór i zmniejsza siłę nośną: automat ciągu dodaje mocy, autopilot podnosi nos i trzyma. Przyrządy pokazują równy lot; jedynym objawem jest powoli rosnąca moc i kąt natarcia.
2. Gdy zabraknie mocy albo autorytetu trymu, autopilot się wyłącza, oddając pilotowi samolot blisko przeciągnięcia i rozstrojony. Dlatego autopiloty sygnalizują nietypowy trym i wychylenia, a procedury każą w oblodzeniu pilotować ręcznie albo pilnować parametrów.
5. 1. Duża waga Q na błędzie wysokości (i jego całce), mała na błędzie prędkości; waga R na przepustnicy określa, jak chętnie regulator używa silnika (lekcja 4.3 automatyki).
2. W kaskadzie: szybka pętla wysokości z dużym K_h i wolny automat ciągu z małym K_u . LQR wyliczy przy tym sprzężenia krzyżowe (np. ster reaguje na błąd prędkości), których kaskada nie ma.

Dynamika lotu · Lekcja 9: Autopilot · Źródła: E. H. J. Pallett, S. Coyle, *Automatic Flight Control* (Blackwell 1993, przedmowa i rozdz. 2, 5, 6, 7, 10); A. Tewari, *Advanced Control of Aircraft, Spacecraft and Rockets* (Wiley 2011, rozdz. 3.6–3.8); P. H. Zipfel, *Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics* (AIAA 2000, rozdz. 9). Wzmocnienia dobrane dla modeli z lekcji 5 i 7. Wszystkie liczby policzone na nowo (tools/verify/t9.py).