

Jacek PIENIĄŻEK

**Kształtowanie współpracy
człowieka z lotniczymi
systemami sterowania**



**OFICyna
WYDAWNICZA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

Opiniodawcy

prof. dr hab. inż. Jan GRUSZECKI
dr hab. inż. Cezary SZCZEPAŃSKI, prof. PWr

Redaktor naczelny

Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej
prof. dr hab. inż. Leonard ZIEMIAŃSKI

Redaktor

Marzena TARAŁA

Przygotowanie matryc

Mariusz TENDERA

Projekt okładki

Joanna MIKUŁA

Autor rysunku na okładce

Jacek PIENIAŻEK

*automatyzacja, czynnik ludzki, sterowanie samolotem
interfejsy systemów technicznych*

automation, human factors, airplane control, HMI

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej
Rzeszów 2019

e-ISBN 978-83-7934-287-7

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
<https://oficyna.prz.edu.pl>

SPIS TREŚCI

Spis ważniejszych oznaczeń i pojęć	7
1. Przedmowa	11
2. Wprowadzenie.....	13
2.1. Człowiek w procesie sterowania.....	13
2.2. Zadania w procesie sterowania	18
2.3. Stanowisko pracy pilota.....	19
3. Modele i sterowanie	23
3.1. Wstęp.....	23
3.2. Model i sterowanie procesem dynamicznym	23
3.2.1. Ogólna postać modelu	23
3.2.2. Uproszczony model ogólny ruchu samolotu	24
3.2.3. Sterowanie ruchem samolotu.....	27
3.2.4. Model hybrydowy	30
3.3. Opis działania człowieka	31
3.3.1. Podstawowe modele działania człowieka	31
3.3.2. Przekaz informacji i świadomość sytuacyjna	36
3.3.3. Poziom umiejętności – sterowanie bieżące	44
3.3.4. Sterowanie ze zmianą trybów	48
3.3.5. Czynniki wpływające na sterowanie	52
3.3.6. Poziom obciążenia	56
4. Automatyzacja i wspomaganie człowieka w procesie sterowania	59
4.1. Poziomy automatyzacji i wspomagania.....	59
4.2. Efekty automatyzacji	64
4.2.1. Zjawiska zaobserwowane w systemach zautomatyzowanych	64
4.2.2. Poziom zaufania.....	66
4.2.3. Wpływ na świadomość sytuacyjną.....	67
4.3. Ostrzeżenie i zabezpieczenie przed niepoprawnym działaniem.....	69
4.3.1. Wprowadzenie	69
4.3.2. Stan procesu dynamicznego	71
4.3.3. Reprezentacja ograniczeń w przestrzeni stanów	73
4.3.4. Ewaluacja ograniczeń dla procesu dynamicznego	75
4.3.5. Zabezpieczenie przed przekroczeniem ograniczeń.....	84

5. Modyfikacje charakterystyk procesu sterowanego	89
5.1. Wstęp	89
5.2. Modyfikacja procesu sterowanego	89
5.2.1. Wpływ układów automatycznego sterowania na charakterystyki procesu sterowanego przez człowieka	89
5.2.2. Bezpośrednia metoda kształtowania właściwości pilotażowych samolotów lekkich według modelu (wzorca)	91
5.3. Modyfikacja charakterystyk interfejsów	95
5.3.1. Informacja, percepcja i koszt informacji	95
5.3.2. Informacja prezentowana przez system wskazań w zadaniu sterowania	103
5.4. Kształtowanie charakterystyki sterownicy	105
5.4.1. Sterownica w procesie sterowania	105
5.4.2. Dopasowanie charakterystyki statycznej sterownicy	106
5.4.3. Badanie charakterystyki sterownicy przy sterowaniu systemem obserwacyjnym	111
5.5. Modyfikacje charakterystyk sygnałów przez filtry	118
5.5.1. Wpływ filtracji na przekaz informacji	118
5.5.2. Wskaźnik przyspieszony	120
5.5.3. Wyświetlacz predykcyjny	122
5.5.4. Modyfikacja charakterystyki dynamicznej sygnału ze sterownicy	124
5.6. Adaptacja charakterystyk interfejsów	125
5.6.1. Czynniki modyfikujące	125
5.6.2. Adaptacja wskaźnika	126
5.6.3. Badanie systemu wskazań	130
5.6.4. Adaptacja charakterystyk interfejsów sterujących	137
5.7. Sterowanie ze zmianą poziomu wspomagania zależnie od wartości sterującej	139
5.7.1. Metodyka sterowania ze zmianą trybów	139
5.7.2. Badanie sterowania ze zmianą poziomu wspomagania zależnie od sygnału ze sterownicy	142
5.7.3. Sterowanie zespołem napędowym za pomocą jednej dźwigni z wykorzystaniem zmiany trybów	147
6. Aktywne organa sterowe	151
6.1. Rola aktywnych organów sterowych w procesie sterowania	151
6.2. Przykładowa konstrukcja aktywnych organów sterowych	153
6.2.1. Założenia i wstępna analiza właściwości	153
6.2.2. Aktywna sterownica z nieliniowymi elementami sprężystymi	155
6.2.3. Aktywna dźwignia sterująca zespołem napędowym	158
6.2.4. Wpływ charakterystyki siły sterownicy na działanie człowieka	161
6.2.5. Badanie wpływu sztywności sterownicy na działania pilota	165

7. Asystent pilota.....	169
7.1. Idea asystenta w procesie sterowania	169
7.2. Funkcje asystenta.....	173
7.2.1. Zadania asystenta	173
7.2.2. Trymowanie	174
7.2.3. Ostrzeganie i przeciwdziałanie	177
7.3. System agentowy i realizacja asystenta.....	179
7.3.1. Pojęcie agenta.....	179
7.3.2. System agentowy	180
7.3.3. Zespołowa świadomość sytuacyjna.....	187
7.3.4. Asystent pilota jako system wieloagentowy	190
7.4. Struktura asystenta pilota z aktywnymi organami sterowymi	193
7.4.1. Opis asystenta pilota.....	193
7.4.2. Eksperymentalna weryfikacja funkcji asystenta	198
7.5. Interfejs informacyjny asystenta w koncepcji EID.....	206
7.5.1. Metodyka EID	206
7.5.2. Zastosowanie metodyki EID do kształtowania interfejsu informacyjnego pilota.....	208
7.6. Badanie pracy asystenta z aktywnymi organami sterowymi	212
8. Podsumowanie.....	217
Dodatki.....	219
A. Ocena współpracy człowieka z systemem sterowania.....	219
B. NASA-TLX.....	221
C. Stanowisko symulacyjne.....	223
Bibliografia	237
Streszczenie.....	259
Summary.....	261

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I POJĘĆ

$A_{m,ij}$	– element macierzy A_m ,
g	– przyspieszenie ziemskie,
$g(s), G(s)$	– transmitancja operatorowa, macierz transmitancji,
I, I_{nn}	– macierz jednostkowa, macierz jednostkowa o wymiarze n ,
p, q, r	– składowe prędkości kątownej w układzie związanym z samolotem,
$S(f), S(\omega)$	– widma gęstości mocy w dziedzinie argumentu częstotliwości (f) lub pulsacji (ω),
t	– zmienna niezależna (czas),
$T(x)(t)$	– operator $T: X \rightarrow Y$, gdzie X, Y są przestrzeniami funkcji,
$T(x;\pi)(t)$	– operator z parametrami π ,
V	– prędkość lotu,
x	– zmienna lub wektor,
$\{x\}$	– zbiór zmiennych zawartych w wektorze,
x_i	– element wektora x ,
$x_{m,i}$	– element wektora x_m ,
σ^2	– wariancja,
Φ, Θ, Ψ	– kąty transformacji lotniczej (przechylenia, pochylenia, odchylenia).

aparat latający – ogólnie dowolny statek powietrzny (samolot, śmigłowiec) z załogą na pokładzie lub bezzałogowy,

automatyka – „dyscyplina zajmująca się podstawami teorii i praktyczną realizacją urządzeń sterujących procesami bez udziału lub z ograniczonym udziałem człowieka”¹,

automatyzacja – „wprowadzanie do produkcji, transportu (...) środków technicznych w celu samoczynnego przebiegu sterowania, regulowania i kontrolowania różnych procesów i operacji”²; w zakresie działań człowieka zjawisko polegające na powstaniu umiejętności realizacji określonych czynności z niskim udziałem świadomości,

bezzałogowy aparat latający – statek powietrzny bez załogi pokładowej. Podczas realizacji założonych zadań może być sterowany zdalnie ze stacji kontroli lotu bądź przez własne sterowniki,

¹ Słownik Języka Polskiego, PWN, Warszawa 1998.

² Ibidem.

- efektor – element służący do wyprowadzenia informacji w formie działania. Dla typowych interakcji człowieka z otoczeniem jest związany z odpowiednimi grupami mięśni. W pewnych zastosowaniach podejmowane są próby bezpośredniego wykorzystania informacji przekazywanej przez neurony,
- FMS (*flight management system*) – system zarządzania lotem,
- obiekt sterowany – układ techniczny, zespół elementów, w szczególności samolot, którego działanie lub ruch są przedmiotem sterowania,
- obszar katastrofalny – obszar w przestrzeni takich stanów, w których katastrofa samolotu jest nieunikniona,
- obszar preferowany – obszar w przestrzeni stanów, w których stan samolotu powinien się znajdować, zależnie od tego, na ile jest określony cel sterowania (np. jako zadana trajektoria albo tylko punkt końcowy, a wreszcie lot swobodny, kiedy samolot może się poruszać w dowolny sposób w pewnym obszarze przestrzeni). Ma różną objętość i kształt. Dla ściśle określonej trajektorii wartości niektórych zmiennych są ograniczone do wąskich przedziałów wokół wartości zadanej. Przy braku celu sterowania obszar ten pokrywa się z obszarem dopuszczalnym, a jego opisanie zbiorem rozmytym pozwala uwzględnić poziom preferencji,
- obszar zabroniony – obszar w przestrzeni stanów, w którym ze względu na istniejące jakieś niebezpieczeństwo stan samolotu nie powinien się znaleźć. Ze względu na różny poziom zagrożenia obszar ten warto oznaczyć wskaźnikiem poziomu niebezpieczeństwa (interpretacja w dziedzinie logiki rozmytej),
- ograniczenie miękkie – wartość, która nie powinna być przekraczana, co należy zapewnić przez odpowiednie sterowanie obiektem. Ograniczenia te mają postać zaleceń wynikających z właściwości obiektu (np. wytrzymałości konstrukcji lub charakterystyki zachowania się obiektu w pewnych sytuacjach),
- ograniczenie sztywne – ograniczenie, którego nie można przekroczyć, co wynika z właściwości konstrukcji, np. maksymalne wychylenie steru (uszkodzenia skutkujące zmianą ograniczeń sztywnych nie będą rozpatrywane),
- percepcja – przetwarzanie informacji sensorycznej w kontekście znaczeniowym,
- proces dynamiczny – opis części lub całego obiektu, który wiąże zmienne stanu ze zmiennymi wejściowymi, mający postać równań (różniczkowych lub różnicowych – zależnie od specyfiki),
- przestrzeń lotnicza (*airspace*) – przestrzeń (3D), w której porusza się samolot, zawierająca elementy stałe i ruchome. Ze względu na zmienność w czasie można ją w niektórych zagadnieniach traktować jako 4D,

- przestrzeń stanów – ogólnie przestrzeń \mathbb{R}^n obejmująca zmienne opisujące stan, tutaj samolotu (m.in. zawiera także położenie samolotu, a zatem obejmuje przestrzeń, w której porusza się samolot),
- recepja – odbiór informacji sensorycznej,
- receptor – element odbierający bodźce (np. pręciki i czopki reagujące na światło, komórki czuciowe) i ogólniej: organy związane z odpowiednim zmysłem,
- SKL (stacja kontroli lotu) – stanowisko operatora lub operatorów przeznaczone do sterowania oraz nadzorowania ruchu i aparatury aparatu bezzałogowego lub zespołu aparatów,
- stan nadzwyczajny – chwilowo dopuszczony stan w obszarze zabronionym. Dopuszczenie pewnych przekroczeń wynika z konieczności uniknięcia wejścia stanu samolotu w obszar o wysokim poziomie niebezpieczeństwa, w tym w obszar katastrofalny. Jest to więc obszar stanów, które pojawiają się przy wyborze mniejszego niebezpieczeństwa,
- stan obiektu (dynamicznego) – określona w pewien sposób (np. liczbowy, opisowy) właściwość obiektu zmieniająca się w czasie (w odróżnieniu od parametrów, które są niezmiennicze), na którą mają wpływ sygnały sterujące i zakłócenia,
- sterowanie zdalne – sterowanie procesem dynamicznym, obiektem ruchomym itp., kiedy sygnały sterujące i informacja o stanie są przesyłane łączem teletransmisyjnym (ewentualnie linią przewodową),
- transmitancja układu zamkniętego – transmitancja opisująca liniowy lub zlinearyzowany układ regulacji ze sprzężeniem zwrotnym,
- zasoby – (*resources*) w psychologii zasobami określa się to, co dla człowieka cenne (np. zasoby materialne, tj. będące w jego posiadaniu i zasoby osobiste, obejmujące umiejętności i kompetencje). W modelu człowieka operatora istotne będą zasoby wykorzystywane podczas realizacji ogólnie rozumianego zadania sterowania. Zasoby w tym sensie obejmują zarówno receptory i efekторы, jak i elementy przetwarzające informację (*central processing*) oraz pamięć trwałą i przemijającą (*permanent and working memories*),
- zdolności – (*capacities*) określają możliwość realizacji określonych czynności oraz części składowych działań. Obejmują różne zdolności realizacji przetwarzania informacji powiązane z zasobami wewnętrznymi człowieka.

1. PRZEDMOWA

Geneza niniejszej monografii łączy się z pytaniem – jaka powinna być rola człowieka w procesie sterowania? Coraz doskonalsze systemy sterowania automatycznego są konstruowane w taki sposób, aby samodzielnie realizować cały proces sterowania lub znaczącą część czynności sterowania. Mimo to ciągle uczestniczy w tym procesie człowiek i jest on najczęściej odpowiedzialny za bezpieczeństwo i poprawność realizacji celu sterowania.

Wynika stąd, że system sterowania, tak jak i obiekt należy traktować jako narzędzia, które człowiek wykorzystuje do realizacji określonego przez siebie bądź zadanego zadania, prowadzącego do realizacji celu. Każda ingerencja w formę, charakterystyki oraz sposób pracy obiektu sterowanego może wpływać na sposób działania człowieka. Analiza dostępnej wiedzy oraz opracowanie metod kształtujących współpracę człowieka z systemem są głównymi zagadnieniami poruszonymi w monografii.

W rozdziale 2. zaprezentowano ogólną strukturę sterowania z udziałem człowieka oraz omówiono typowe zadania pilota. Punkt 3.1 prezentuje modele procesu sterowania i strukturę systemu sterowania, pomijając jednak szczegóły opisywane w literaturze. Więcej uwagi poświęcono modelom działania człowieka, które zaprezentowano w pkt 3.2. Efektem analizy literatury dotyczącej funkcjonowania człowieka podczas sterowania jest model przedstawiony na rys. 3.7. Z modelu wynikają możliwości wspomagania człowieka na różnych etapach procesu przetwarzania informacji.

W rozdziale 4. przeprowadzono analizę efektów zaobserwowanych po wprowadzeniu automatyzacji. Przegląd ten obrazuje niedostatki systemów automatycznego sterowania, w których nie uwzględnia się czynnika ludzkiego. Ważnym elementem wspomagającym pracę człowieka jest system ostrzegania i zabezpieczeń przed doprowadzeniem do niepoprawnego stanu. W punkcie 4.2 przedstawiono analizę tego zagadnienia i zaprezentowano metody realizacji w systemach automatycznego sterowania.

Rozdział 5. prezentuje opracowane przez autora metody kształtowania charakterystyk systemu z zakresu przekazu informacji oraz adaptacji systemu automatycznego sterowania. Wyniki badań wykazują, że uwzględnienie właściwości człowieka podczas realizacji projektu technicznego umożliwia równocześnie uzyskanie wysokiej jakości sterowania i zmniejszenie obciążenia zadaniowego w odniesieniu do systemów klasycznych.

W rozdziale 6. zaprezentowano aktywną sterownicę oraz aktywną dźwignię sterującą zespołem napędowym. Elementy te posłużyły do realizacji nowej koncepcji asystenta pilota, co opisano w rozdz. 7. Asystent pilota wykorzystujący metodykę systemów wieloagentowych umożliwia elastyczne łączenie wielu funkcji wspomagających pilota. Główne zadania asystenta lokują się w dwóch obszarach: kształtowania charakterystyk obiektu oraz ostrzegania przed niebezpieczeństwem. Zastosowany przekaz ostrzeżeń, wykorzystujący zarówno kanał wzrokowy, jak i reakcję aktywnych organów sterowych, uwzględnia sposoby działania człowieka podczas realizacji sterowania, prawidłowo kształtując świadomość sytuacyjną. Opracowane rozwiązania zostały przebadane na stanowisku symulacyjnym przedstawionym w dodatku C.

Autor jest wdzięczny wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania niniejszej pracy. W szczególny sposób dziękuje Recenzentom za uwagi, które ukształtowały ostateczną formę monografii oraz Kolegom z Katedry Awioniki i Sterowania za wspólne prace i wymianę poglądów.

Wykonanie badań i stworzenie zaprezentowanych idei było możliwe dzięki finansowaniu przez MNiSW projektu badawczego N N509 0828 33. Z kolei podczas realizacji projektów rozwojowych 0576/R/2/T02/2007/03 i 0116/R/T00/2010/11 powstały odpowiednio: idea sterowania ze zmianą trybów oraz stanowisko badawcze z głowicą obserwacyjną.

2. WPROWADZENIE

2.1. Człowiek w procesie sterowania

Zadania realizowane przez człowieka w lotnictwie dotyczą: sterowania ruchem aparatu latającego (samolotu, śmigłowca), gdy człowiek znajduje się na pokładzie tego aparatu, sterowania ruchem aparatu bezzałogowego ze stacji kontroli lotu oraz sterowania zespołem aparatów latających, a także sterowania zainstalowaną na pokładzie aparatu aparaturą przeznaczoną do realizacji określonych zadań, takich jak: detekcja, obserwacja, przenoszenie ładunków.

Ogólna struktura systemu sterowania z udziałem człowieka została przedstawiona na rys. 2.1. Podstawowe elementy składowe systemu to:

- obiekt sterowany przez człowieka, zawierający
 - procesy dynamiczne reprezentujące zachowanie obiektu sterowanego,
 - systemy automatycznego sterowania,
 - układy pomiarowe dostarczające informacji o stanie obiektu sterowanego,
- procesy będące składnikami sterowania realizowanego przez człowieka
 - odbiór informacji z otoczenia (recepcja i percepcja),
 - przetwarzanie informacji,
 - proces właściwego sterowania, czyli formowania sygnałów sterujących,
 - efekторы (np. stopy, dłonie) i wewnętrzne pętle sterowania efektorami,
- elementy łączące wymienione struktury, czyli interfejsy
 - informacyjne, przez które człowiek otrzymuje informacje o stanie obiektu sterowanego,
 - sterujące, przez które człowiek oddziałuje na obiekt sterowany.

Zobrazowany przepływ sygnałów przedstawia związki występujące pomiędzy poszczególnymi elementami. Stan całego systemu składa się z czterech składników:

- stanu obiektu sterowanego (stan rzeczywisty),
- celu sterowania, który jest realizowany,
- stanu obserwowanego, będącego obrazem stanu obiektu sterowanego utworzonym w umyśle człowieka,
- stanu wewnętrznego człowieka, który nie jest bezpośrednio związany z procesem sterowania.

efektywny uzyskany przez kształtowanie interfejsów oraz w efekcie działania systemu automatycznego sterowania może być lepiej dostosowany do właściwości człowieka niż oryginalne procesy dynamiczne. Aby ten warunek został spełniony, przy wprowadzaniu elementów kształtujących charakterystyki systemu sterowania konieczne jest uwzględnienie cech człowieka i traktowanie systemu technicznego jako narzędzia, za pomocą którego człowiek realizuje założone cele.

Rozwój lotnictwa, a w szczególności dążenie do dopasowania właściwości samolotów do predyspozycji człowieka, i równoległe następujący rozwój teorii sterowania oraz metod opisu procesów dynamicznych inspirował w latach 60. XX w. do przeprowadzenia wielu badań, których celem było określenie modelu człowieka operatora. Opracowany w tym czasie model pilota jako regulatora w postaci układu liniowego o adaptowanych parametrach był i jest nadal wykorzystywany do analizy jakości procesu sterowania obiektem technicznym z udziałem człowieka. Niestety, model ten poprawnie opisuje sterowanie tylko wtedy, gdy operator nie zmienia sposobu działania i działa jako regulator. Tymczasem powszechne zastosowanie układów automatyki powoduje w konsekwencji takie zmiany właściwości samolotów, że człowiek musi całkowicie zmieniać sposób działania.

Złożoność interakcji w zespole człowiek–maszyna wynika zarówno ze sposobu działania człowieka, jak i ze złożoności części technicznej systemu oraz interfejsów zastosowanych pomiędzy człowiekiem a systemem. Rozwój techniki powoduje zwiększenie zakresu realizowanych przez różne urządzenia funkcji oraz poprawia jakość działania urządzeń. W tym rozwoju można zauważyć kilka faz, które należy powiązać z rozwojem technologii.

W pierwszej fazie głównym problemem projektantów było znalezienie sposobu rozwiązania zagadnień podstawowych. Poszukiwanie odpowiednich algorytmów i układów realizujących te algorytmy pochłaniało większość czasu projektowania i ograniczało możliwości realizacji zbyt złożonych koncepcji.

Opanowanie podstawowych zasad dotyczących teorii sterowania oraz dostępność sprawdzonych technologii realizacji układów elektrycznych, mechanicznych, hydraulicznych umożliwiło realizację prostych (pod względem koncepcyjnym, z dzisiejszej perspektywy) układów sterowania. W tym okresie zwiększanie funkcjonalności powodowało zwiększenie liczby interfejsów. W konsekwencji rosło obciążenie zadaniowe operatora. W lotnictwie ta tendencja przejawiała się wzrostem liczby wskaźników i liczby elementów kontrolnych. To z kolei wymuszało zwiększenie liczby członków załogi.

Wprowadzenie systemów programowalnych, realizujących różne funkcje w formie oprogramowania stanowiło ważny etap rozwoju urządzeń. Do tego momentu trudno było połączyć równoczesne sterowanie kilkoma zmiennymi i to ograniczało praktyczną realizację algorytmów optymalizujących procesy sterowania. Technika komputerowa poszerzyła także możliwości z zakresu form prezentacji stanu procesów sterowanych. Formę interfejsu informacyjnego

kształtowanego przez oprogramowanie przestały ograniczać czynniki techniczne.

Podczas realizacji coraz bardziej złożonych projektów pojawiły się problemy, które wynikały ze złożoności interakcji w zespole człowiek–maszyna. Dążenie do podniesienia efektywności działania prowadzi do coraz doskonalszych systemów sterowania automatycznego. Mimo to stwierdzono problemy dotyczące współdziałania systemu z człowiekiem. Część efektów wynikających ze współdziałania poznano w wyniku przeprowadzonych eksperymentów badawczych, część – niestety – analizując przyczyny katastrof.

Wspomniane problemy skierowały uwagę badaczy na czynnik ludzki i zawoocowały pojawieniem się koncepcji projektowania zorientowanego na użytkownika (*user-centered design*). Prowadzone badania i obserwacje dotyczące wpływu zastosowanych systemów sterowania poszerzają wiedzę o sposobie działania człowieka w zadaniach sterowania, co stanowi podstawę do konstruowania systemów umożliwiających efektywniejszą realizację zadań oraz coraz lepsze dostosowanie do predyspozycji człowieka. Doskonalsze, dzięki automatyzacji, urządzenia umożliwiają realizację nowych zadań (np. rozpoznanie za pomocą zespołu autonomicznych i zdalnie sterowanych aparatów) oraz zwiększają efektywność zadań realizowanych wcześniej starymi środkami (np. sterowanie lotem samolotu i zarządzanie pracą systemów pokładowych). Systemy te są jednak coraz bardziej złożone, a to przy nieuwzględnieniu zagadnienia współdziałania może skutkować utrudnieniami w ich obsłudze i wykorzystywaniu.

Złożoność systemów technicznych wiąże się z kolejnym czynnikiem – możliwością zmiany trybu pracy, wynikającą z uwzględnienia zmiany warunków bądź z zastosowanego algorytmu działania. Możliwość zmian konfiguracji poszerza funkcjonalność systemu. Niestety, równocześnie komplikuje się model efektywny obiektu sterowanego i zwiększa liczba zmiennych opisujących stan systemu.

W okresie rozwoju techniki z zakresu uzyskiwania i przetwarzania informacji podstawowym problemem było wykonanie układów przekazujących informacje o odpowiednim poziomie wiarygodności i dostarczenie tych informacji do odbiorcy. Obecnie, w erze informacyjnej większość problemów wynika z konieczności wyboru informacji istotnych, odpowiedniego przetworzenia informacji i określenia formy przekazu dostosowanej do realizowanego zadania oraz predyspozycji człowieka.

Zaprezentowana zmiana w sposobie projektowania układów technicznych współpracujących z człowiekiem wynika z rozróżnienia dwóch sposobów rozwiązywania zagadnienia współpracy:

- technocentrycznego (*technocentric*) – podporządkowanego sposobom rozwiązywania zadań,
- skoncentrowanego na człowieku (*humanocentric*) – podporządkowanego prawidłowemu współdziałaniu z człowiekiem.

Współczesne systemy automatyki rozwijane w efekcie poszukiwania doskonalszych rozwiązań sposobów sterowania pozwalają na realizację wielu zadań lotniczych w sposób całkowicie autonomiczny, kiedy rola człowieka ogranicza się do określenia planu lotu lub jedynie celu misji lotniczej. Sterowanie zgodne z planem, a w drugim wypadku także określenie planu realizacji misji, jest zadaniem systemów automatycznego sterowania. Równocześnie systemy sterowania posiadają funkcjonalność zapewniającą bezpieczne działanie w warunkach zaburzeń zewnętrznych oraz wewnętrznych (np. awarii podsystemów). Mimo tych właściwości efektywność wykorzystania systemów automatycznego sterowania przez człowieka może być ograniczona. Gdy podczas realizacji zadań konieczny jest udział człowieka: pilota statku powietrznego, operatora stacji kontroli lotu systemu bezzałogowego lub operatora lotniczego systemu obserwacyjnego, system sterowania należy traktować jako część obiektu, jakim steruje człowiek, realizując określone cele wynikające z zadań.

Zautomatyzowane systemy zawierają funkcjonalność, która mogłaby posłużyć do wspomagania sterowania realizowanego przez człowieka. Aby jednak istniała możliwość efektywnego jej wykorzystania, konieczne jest inne traktowanie systemów automatyki. Potraktowanie systemu sterowania jako kolejnego członka załogi, asystenta pilota powoduje zmianę sposobu projektowania. Zakres wspomagania powinien wynikać z analizy niedostatków związanych ze zdolnościami i zasobami człowieka, analizy procesu przetwarzania informacji i określenia na tej podstawie czynników poprawiających efektywność realizacji celu sterowania i kompensujących niekorzystne efekty. Zastępowanie człowieka przez system automatycznego sterowania przy takim podejściu jest jednym z wielu składników kształtujących współpracę człowieka z systemem sterowania.

Analizując współpracę człowieka z systemem wspomagającym, konieczne jest uwzględnienie takich czynników, jak świadomość sytuacyjna, poziom obciążenia zadaniowego, subiektywna ocena pracy systemu, a w szczególności poziom zaufania do systemu. Mimo że czynniki te dotyczą człowieka, to dla konstruktora powinny być takimi samymi wytycznymi, jak niezawodność i jakość realizowanych zadań.

W projektach badawczych dotyczących nowych koncepcji sterowania w ruchu lotniczym (tj. zwiększenie transportu osobistego, zastosowanie małych samolotów w systemie transportowym) oraz wspólnego korzystania samolotów bezzałogowych i załogowych z przestrzeni lotniczej, wspomaganie działań pilotażowych, a także nawigacji i oceny stanu samolotu oraz stanu otoczenia jest kluczowe dla bezpieczeństwa i poprawności synchronizacji działania aparatów latających jako elementów systemu transportowego.

2.2. Zadania w procesie sterowania

Określenie zadań realizowanych w procesie sterowania stanowi podstawę do poszukiwania sposobów ich wspomagania. W podejściu technocentrycznym zadanie sterowania jest często rozumiane w wąskim sensie realizacji określonego sposobu sterowania (np. stabilizacja wartości określonych zmiennych stanu, wykonanie przelotu po zadanej trajektorii). Biorąc pod uwagę czynności, które są realizowane przez pilotów, można wymienić następujące zadania sterowania samolotem:

- stabilizację orientacji przestrzennej,
- sterowanie ruchem samolotu w przestrzeni ze sterowaniem prędkości lotu,
- prowadzenie nawigacji i określenie planu lotu,
- monitorowanie stanu samolotu oraz stanu otoczenia samolotu i korygowanie planu lotu odpowiednio do sytuacji,
- monitorowanie poprawności działania elementów i urządzeń pokładowych oraz dostosowanie sposobu sterowania do stanu,
- określenie sposobu działania na podstawie ogólnego celu i aktualnych warunków,
- obsługa aparatury pokładowej.

Obsługa aparatury pokładowej obejmuje zarówno czynności dodatkowe w stosunku do samego procesu sterowania (np. prowadzenie korespondencji radiowej), jak i czynności wynikające bezpośrednio z celu realizowanego zadania (np. sterowanie aparaturą obserwacyjną).

Składnikami procesu sterowania są: podejmowanie decyzji i planowanie. Ze względu na szczegółowość definicji celu sterowania oraz horyzont czasowy realizacji tej decyzji można wyróżnić trzy poziomy sterowania:

- sterowanie bieżące,
- taktyka realizacji zadania,
- strategia realizacji misji.

Strategia określa ogólny sposób realizacji celu misji, definiując zadania będące składnikami tej misji. Dopiero z tego celu wynikają zadania bardziej szczegółowe. Określenie zadań szczegółowych jest możliwe na poziomie strategicznym, ale konieczne jest uwzględnienie faktu, że przewidywanie przyszłych warunków realizacji jest tym mniej pewne, im dłuższy jest horyzont czasowy. Zakres decyzji na poziomie taktycznym powinien uwzględniać możliwość zmiany sytuacji. W tym miejscu pojawia się zagadnienie wariantowości rozwiązań, które pozwala na sformułowanie celów cząstkowych i określenie alternatywnych metod osiągnięcia tych celów, czyli wariantowych taktyk. Za realizację taktyki jest odpowiedzialny poziom bieżący, wykorzystujący aktualne wartości zmiennych. Oceny i reakcje są zatem adekwatne jedynie w krótkiej perspektywie czasowej. Poszerzona perspektywa na poziomie taktycznym umożliwia oce-

nę nie tyle stanu obecnego, co przyjętego sposobu sterowania przez ocenę przewidywanych efektów.

Sterowanie bieżące to typowe działania sterujące, mające doprowadzić do zrealizowania założonego w zadaniu celu sterowania. Na tym poziomie istotne są umiejętności manualne i trening z zakresu odbioru i wykorzystania informacji, czyli np. technika pilotażu.

W szerszym znaczeniu sterowania wprowadza się jeszcze dwa poziomy [165]: politykę i filozofię. Zarówno polityka, jak i filozofia są czynnikami wpływającymi na właściwy proces sterowania, np. przez ograniczenia prawne, preferowane metody i kryteria oceny.

Poza pilotem w operacjach lotniczych część zadań dotyczących sterowania realizują: kontrola ruchu lotniczego oraz przedsiębiorstwa i instytucje zajmujące się działalnością lotniczą [188]. Szczególną rolę pełni kontrola ruchu lotniczego, jako nadrzędny element systemu sterowania synchronizujący działania wielu aparatów latających. Należy jednak zwrócić uwagę, że wobec wzrostu natężenia ruchu lotniczego pojawiają się propozycje przeniesienia odpowiedzialności za separację w ruchu lotniczym do kokpitu samolotów bądź też zwiększenia poziomu automatyzacji naziemnych systemów kontroli ruchu [104, 202]. Rozproszony system kontroli ruchu lotniczego stawia nowe wyzwania, dotyczące organizacji współdziałania statków powietrznych, automatyzacji samolotów i włączenia pilota w zadania sterowania.

2.3. Stanowisko pracy pilota

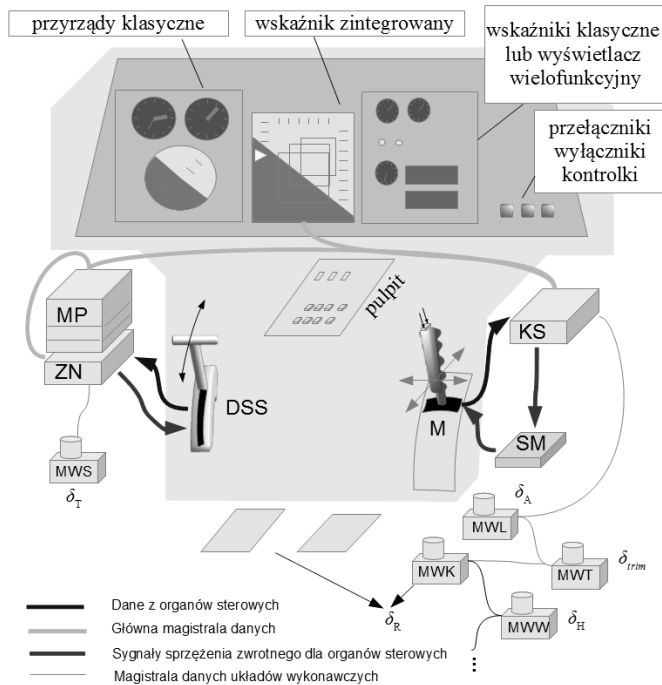
Pilot realizuje zadanie sterowania samolotem w kokpicie samolotu, który zawiera elementy dostarczające informacji o stanie samolotu i interfejsy sterujące.

Wśród interfejsów sterujących zostaną wyróżnione organa sterowe wykorzystywane w odniesieniu do obiektów poruszających się i służące przekazywaniu sygnałów sterujących ruchem. W klasycznych rozwiązaniach elementy pełniące podane funkcje mają zwykle postać dźwigni (o jednym, dwóch lub rzadziej trzech stopniach swobody), koła sterowego lub popychacza. Ich użycie wymaga zadziałania znaczącą siłą, a reakcja siłowa stanowi istotną informację zwrotną. Ważną cechą organów sterowych jest więź pomiędzy człowiekiem a urządzeniem, uzyskiwana dzięki tej reakcji. Podstawowe organa sterowe pilota to drążek lub wolant, orczyk oraz dźwignie sterujące zespołem napędowym. Organa sterowe przy klasycznych napędach mechanicznych są bezpośrednio połączone z płaszczyznami sterowymi samolotu i elementami regulacyjnymi zespołu napędowego.

Zaawansowane systemy sterowania samolotem, obecnie powszechnie stosowane w samolotach transportowych oraz wojskowych, wykorzystują układy sterowania pośredniego, w których nie występuje bezpośrednia więź mechanicz-

na pomiędzy sterownicą a płaszczyzną sterową. Pilot, wychylając organy sterowania, przekazuje do komputera sterującego nakaz wykonania odpowiedniego manewru, natomiast kąty wychylania sterów są wyliczane na podstawie założonych praw sterowania.

Kokpit z elementami systemu pośredniego sterowania przedstawiono na rys. 2.2. Poza elementami interfejsów (symbolizującymi różne rodzaje interfejsów informacyjnych, organa sterowe, przełączniki) zobrazowano: moduły pomiarowe (MP) przekazujące informacje do systemu sterowania i na wyświetlacze (interfejsy informacyjne), komputer sterujący lotem (KS) odbierający sygnały sterujące ze sterownicy (M), sterownik zespołu napędowego (ZN) odbierający informacje sterujące z dźwigni sterującej (DSS) oraz mechanizmy wykonawcze (MWi). Zaprezentowana struktura odzwierciedla eksperymentalny system sterowania dla małych samolotów [284, 286]. Dodatkowo zaznaczone zostały elementy związane ze sterowaniem aktywnych organów sterowych: sterownik sterownicy SM oraz sygnały zwrotne z ZN obrazujące możliwość sterowania położeniem i siłą reakcji dźwigni przez sterownik zespołu napędowego.



Rys. 2.2. Ogólna struktura kokpitu samolotu z elementami systemu sterowania

Liczba i rodzaj interfejsów sterujących zależą od zastosowanego wyposażenia samolotu. Niektóre układy redukują liczbę interfejsów (np. konfiguracja

zaprezentowana na rys. 2.2 jest możliwa podczas automatyzacji sterowania zespołem napędowym redukującym liczbę dźwigni do jednej zamiast trzech: sterowania przepustnicą, sterowania składem mieszanki i sterowania skokiem śmigła), inne mogą ją zwiększać (np. dodanie autopilota do samolotu z mechanicznymi napędami sterów oznacza wprowadzenie dodatkowych interfejsów do jego obsługi).

Systemy stosowane w lotnictwie komunikacyjnym składają się z elementów zwielokrotnionych, natomiast w kokpicie znajdują się dwa stanowiska pilotów [46, 155], chociaż proponuje się zredukowanie liczby członków załogi do jednego pilota, wspomaganego przez systemy kokpitu [104].

Interfejsy informacyjne kokpitu obejmują wiele form prezentacji, m.in.:

- klasyczne wskaźniki przyrządów pomiarowych,
- kontrolki,
- wskaźniki zintegrowane,
- systemy syntetycznej i wspomaganej wizji,
- wskaźniki przeziernie,
- wskaźniki tunelowe na wyświetlaczach przeziernych lub wskaźnikach syntetycznej wizji,
- komunikaty głosowe.

W zakresie formy prezentacji stosuje się wskazania analogowe, cyfrowe, obrazkowe oraz wizualizację przestrzeni 3D.

Zastępowanie wskaźników indywidualnych przez systemy zintegrowane rozpoczęło się w latach 70. XX w., kiedy liczba różnych wskaźników i kontrollek w kokpicie wzrosła do tego stopnia, że problemem stał się nadmiar zmiennych przekazywanych równocześnie przez indywidualne wskaźniki poszczególnych układów pomiarowych i sygnalizacyjnych [188, 255]. W efekcie, w tak rozbudowanych systemach, mimo przekazywania wszystkich składników danych nie ma gwarancji odbioru informacji istotnej w aktualnej sytuacji. Dokonane zmiany z zakresu przetwarzania i prezentacji danych doprowadziły do uporządkowania strumienia informacji, nadal prowadzi się jednak badania nad sposobami kształtowania przekazu ułatwiającego realizację zadań, a także celem określenia właściwości nowych rodzajów interfejsów.

Poza interfejsami związanymi z kierowaniem lotem samolotu w kokpicie znajdują się elementy związane z kontrolą poprawności działania i obsługą wyposażenia samolotu. Klasycznymi rozwiązaniami są kontrolki, wskaźniki, przełączniki i wyłączniki.

Kolejna grupa interfejsów stosowanych w kokpicie samolotu pojawiła się wraz z funkcjami zarządzania lotem (FMS) i funkcjami zarządzania systemami pokładowymi. Są to interfejsy graficzne GUI (*graphic user interface*), będące elementami graficznymi oprogramowania kokpitu. Są one częścią systemów, które nie tylko zastępują w nowej formie graficznej dotychczasowe interfejsy, ale także realizują w tych systemach nowe funkcje, zastępujące pilota w wyko-

nywaniu czynności związanych głównie z analizą danych opisujących stan samolotu, otoczenia i wyposażenie samolotu.

Wszystkie elementy interfejsów, funkcje i elementy przetwarzające sygnały oraz elementy automatyki wpływają na charakterystyki samolotu jako obiektu sterowanego przez pilota.

3. MODELE I STEROWANIE

3.1. Wstęp

Analiza działania układu technicznego z udziałem człowieka wymaga opisu zarówno sposobu działania samego układu technicznego, jak i działania człowieka operatora realizującego dwa podstawowe zadania, czyli sterowanie oraz nadzór (monitorowanie). Ze względu na różne właściwości samych charakteryzowanych obiektów opisy te znacznie się różnią. Działanie układów technicznych można z reguły przybliżyć równaniami różniczkowymi bądź równaniami różnicowymi. Istniejące w literaturze modele działania człowieka dotyczą wielu właściwości i mimo że prezentują sposób działania w określonych warunkach, to nie umożliwiają zapisania jednoznacznych równań tak jak przy budowie modeli układów technicznych. Wynika stąd podstawowa trudność dotycząca zarówno opisu, jak i analizy systemów, w których człowiek współpracuje z układami technicznymi.

W niniejszym rozdziale podjęto próbę zebrania informacji niezbędnych do opisu, a przede wszystkim koniecznych do zrozumienia sposobu funkcjonowania charakteryzowanych elementów.

3.2. Model i sterowanie procesem dynamicznym

3.2.1. Ogólna postać modelu

Niech opisem procesu dynamicznego, który modeluje zachowanie się układu technicznego sterowanego przez człowieka, będzie równanie różniczkowe:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, z, \pi, t) \\ y &= h(x, u, z, t) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

gdzie występują następujące zmienne: zmienne stanu $x \in \mathbb{R}^n$, zmienne sterujące $u \in \mathbb{R}^m$, zmienne wyjściowe $y \in \mathbb{R}^p$, zakłócenia $z \in \mathbb{R}^q$ oraz π – wektor parametrów. Model opisujący w tej formie ruch samolotu zawiera zależności wynikające z charakterystyk aerodynamicznych, masowych, aeroelastycznych, równań kinematyki oraz charakterystyk zespołu napędowego [23, 64, 82, 92, 209,

225, 259, 268, 288, 319, 332]. Pełny model znajduje zastosowanie w zadaniach symulacji, gdy istotne jest jak najwierniejsze odtworzenie charakterystyk badanego procesu dynamicznego. Posłużył on do realizacji stanowiska badawczego opisanego w dodatku C.

Często wpływ sygnałów zewnętrznych można wydzielić z funkcji f i wtedy równanie (3.1) przyjmuje formę:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(x, \pi) + g(x, \pi) \cdot u + g_z(x, \pi) \cdot z \\ y &= h(x) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Postać (3.2) jest podstawą dla syntezy układów sterowania obiektów nieliniowych.

Możliwość uzyskania opisu procesu dynamicznego w formie modelu liniowego znacznie ułatwia syntezę parametrów układu sterowania. Pozwala także na wyliczenie parametrów opisujących charakterystyki obiektu. W modelu ruchu samolotu po linearyzacji uzyskuje się modele liniowe opisujące oscylacje krótko- i długookresowe, holendrowanie, aperiodyczny mod przechylenia, spiralę [23, 259, 268].

Model liniowy można przedstawić w postaci ogólnej równań stanu:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Ez \\ y &= Cx + Du + Fz \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Z równań (3.3) wynika model zawierający macierze transmitancji operatorowych [52]:

$$Y(s) = G(s)U(s) + G_z(s)Z(s) \quad (3.4)$$

$$\text{gdzie: } G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & \dots \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & \dots \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix}, \quad G_z(s) = \begin{bmatrix} g_{z11}(s) & g_{z12}(s) & \dots \\ g_{z21}(s) & g_{z22}(s) & \dots \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix}.$$

3.2.2. Uproszczony model ogólny ruchu samolotu

Uproszczenie modelu ruchu samolotu przydatne do określenia struktury systemu sterowania wynika z wykorzystania uproszczonych modeli zależności pomiędzy zmiennymi stanu modelu pełnego. Przybliżone zależności są następujące³:

³ Oznaczenia pochodnych aerodynamicznych występujących w równaniach zgodne ze stosowanymi w literaturze.

- wpływ lotek na prędkość kątową przechylenia [23]

$$\dot{p} = L_p p + L_{dA} \delta_A \quad (3.5)$$

- wpływ lotek na prędkość kątową przechylenia w stanach ustalonych

$$p_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = -\frac{L_{dA}}{L_p} \delta_A \Big|_{\delta_A = \text{const}} \quad (3.6)$$

- związek pomiędzy kątem przechylenia φ i prędkością p

$$\dot{\varphi} = p \quad (3.7)$$

- związek pomiędzy kursem a kątem przechylenia w prawidłowym zakręcie

$$\dot{\psi} = \text{tg}(\varphi) \frac{U_0}{g} \quad (3.8)$$

- efekt działania steru kierunku [23]

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_v & Y_r - U_0 \\ N'_v & N'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{dR} \\ N'_{dR} \end{bmatrix} \delta_R \quad (3.9)$$

- wpływ steru wysokości na prędkość kątową q [23]

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_w & U_0 \\ \bar{M}_w & \bar{M}_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{dH} \\ \bar{M}_{dH} \end{bmatrix} \delta_H \quad (3.10)$$

- w stanach ustalonego lotu

$$\Theta = f_{\delta_H}(\delta_H, \delta_T) \quad (3.11)$$

- związek pomiędzy kątem pochylenia Θ a prędkością q w stanach przejściowych

$$\dot{\Theta} = q \quad (3.12)$$

- związek pomiędzy prędkością pionową i prędkością lotu oraz kątami natarcia, pochylenia i toru⁴:

⁴ Składowe wektora prędkości lotu w układzie związanym z samolotem są oznaczone jako u , v , w .

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{w}{u}, \operatorname{tg}(\beta) = \frac{v}{u}, \gamma = \Theta - \alpha \quad (3.13)$$

- położenie samolotu w układzie ziemskim (F_E)

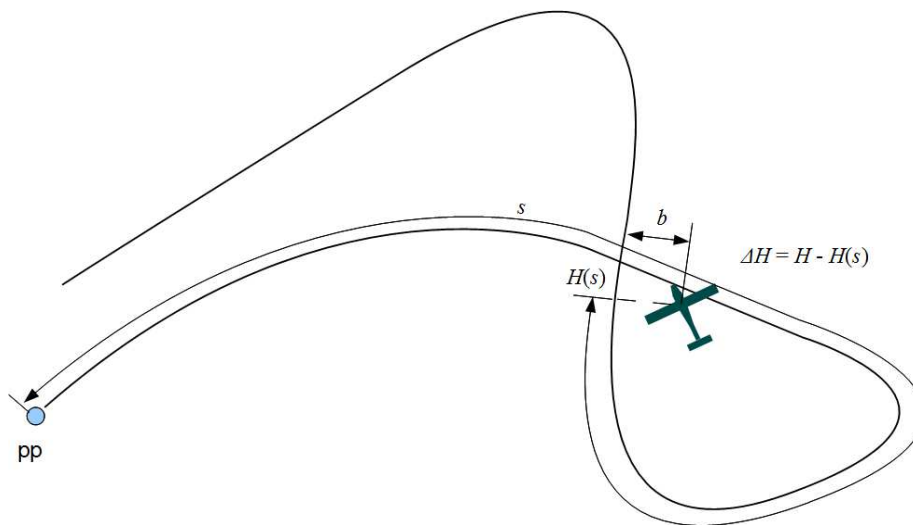
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ H \end{bmatrix} = \int L_{EB}(\Phi, \Theta, \Psi) \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} dt \quad (3.14)$$

gdzie L_{EB} jest macierzą transformacji obrotu z układu związanego z samolotem do układu ziemskiego,

- położenie samolotu względem trajektorii [218]

$$\begin{bmatrix} b \\ \Delta H \\ s \end{bmatrix} = f_{track} \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ h \end{bmatrix}, track \right) \quad (3.15)$$

gdzie $track$ jest pewnym opisem trajektorii zadanej, a funkcja f_{track} określa odległość od trajektorii w płaszczyźnie poziomej b , odchyłkę wysokości ΔH i odległość s punktu na trajektorii najbliższego aktualnemu położeniu samolotu z uwzględnieniem już zrealizowanego fragmentu planu lotu, liczoną po trajektorii zadanej od jej początku (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Parametry opisu względem trajektorii

Ciąg wytwarzany przez zespół napędowy w stanie ustalonym można przełożyć na zależność prędkości lotu przy stałym kącie pochylenia:

$$V = f_1(\delta_T, \Theta, \rho) \quad (3.16)$$

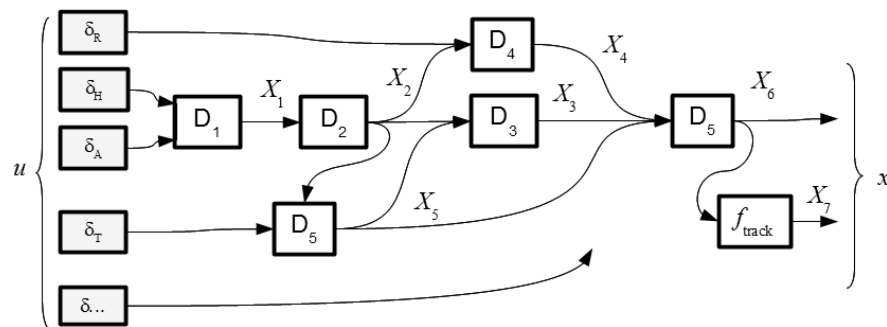
lub kąta pochylenia przy stałej prędkości:

$$\Theta = f_2(\delta_T, V, \rho) \quad (3.17)$$

Struktura modelu samolotu wynikająca z zależności uproszczonych, z następującymi zmiennymi stanu:

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = \{p, q\} \\ X_2 = \{\Phi, \Theta, w\} \\ X_3 = \{H, r\} \\ X_4 = \{\Psi\} \\ X_5 = \{V\} \\ X_6 = \{x, y\} \\ X_7 = \{b, s, \Delta H\} \end{array} \right\} \quad (3.18)$$

została przedstawiona na rys. 3.2. Elementy D_i symbolizują przedstawione uprzednio zależności.



Rys. 3.2. Schemat struktury ogólnego modelu samolotu z wyróżnionymi składnikami wektora stanu

3.2.3. Sterowanie ruchem samolotu

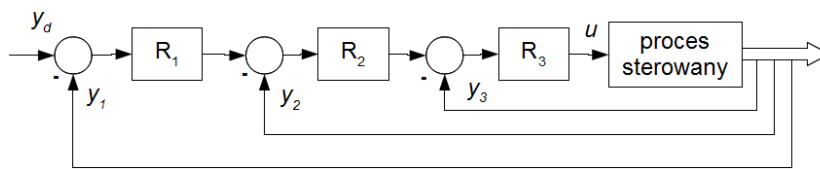
Niech model procesu dynamicznego będzie opisany równaniami, dla których w pewnym zakresie stanów (dla obiektu liniowego będzie ta właściwość

utrzymana w całej przestrzeni stanów) można stwierdzić, pomiędzy pewnymi zmiennymi stanu, zależność:

$$x_a = \frac{dx_b}{dt} + \Delta_a \quad (3.19)$$

Wtedy zmienna x_a jest pochodną zmiennej x_b z dokładnością Δ_a . Takie zależności występują w uproszczonym modelu ogólnym ruchu samolotu. Jeśli dodatkowo liczba zmiennych stanu przekracza liczbę wejść sterujących, to nie ma możliwości takiego sterowania, aby wszystkie zmienne stanu osiągały równocześnie założone niezależnie wartości. Sterując wielkością x_b , powoduje się natomiast odpowiednie zmiany wielkości x_a . W strukturze warstwowej stosuje się regulator wielkości x_a sterowany przez regulator wielkości x_b , pracujący w zewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego.

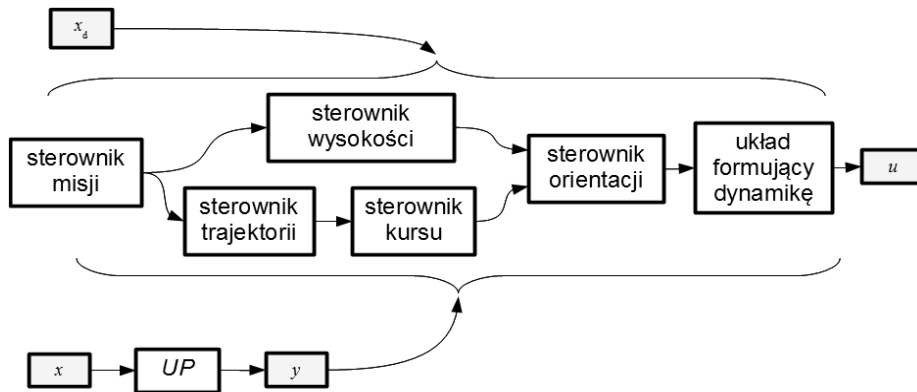
Strukturę warstwową układu sterowania dla większej liczby zmiennych przedstawia rys. 3.3. Realizując strukturę warstwową, gdy kolejne zmienne stanu spełniają warunek (3.19), ma się zagwarantowane to, że dynamika wewnętrznych pętli jest szybsza niż pętli zewnętrznych i wtedy kolejne pętle sprzężenia zwrotnego stanowią kolejne warstwy wokół procesu sterowania.



Rys. 3.3. Warstwowa struktura układu sterowania ze sprzężeniami zwrotnymi

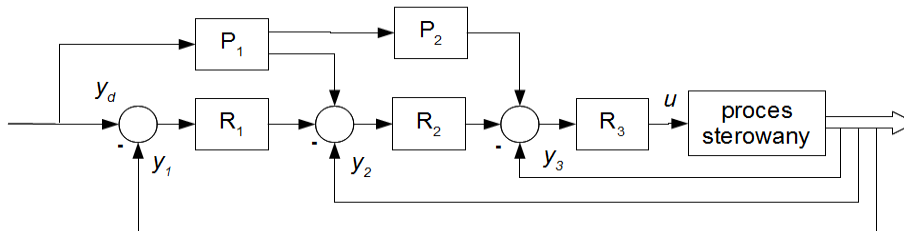
Na rysunku 3.4 została przedstawiona ogólnie typowa struktura systemu sterowania samolotem. W zależności od wymaganego sposobu działania systemu, określonego przez zadane wartości zmiennych stanu x_d , aktywne są różne sterowniki. Zaprezentowana struktura obrazuje zarówno sposób działania układów automatycznych, jak i pilota. Ze struktury tej wynikają kolejno następujące zadania:

- stabilizacja orientacji samolotu,
- zadawanie i utrzymywanie wartości kątów orientacji,
- sterowanie kierunkiem ruchu samolotu (kurs lub kąt drogi, kąt toru lub prędkość pionowa),
- stabilizacja wysokości lotu oraz manewry pionowe z zadawanym profilem wysokości,
- sterowanie położeniem samolotu (utrzymywanie samolotu na trajektorii),
- planowanie trajektorii umożliwiającej realizację celu misji lotniczej.



Rys. 3.4. Ogólna struktura systemu sterowania samolotem

Układy pomiarowe (UP) dostarczają informacji o stanie samolotu. Wartości zadane (pożądane) mogą wynikać bezpośrednio z założonego sposobu działania. Ze schematu struktury wynika natomiast to, że sterowniki wewnętrzne otrzymują wartości zadawane wyliczone przez sterowniki zewnętrzne.



Rys. 3.5. Warstwowa struktura układu sterowania ze sprzężeniami zwrotnymi i działaniami przyspieszającymi

W strukturze warstwowej istnieje także możliwość wprowadzenia działań przyspieszających, które są realizowane w układzie otwartym (rys. 3.5). Sterowanie z działaniem wyprzedzającym obejmuje zarówno rozwinięcie klasycznych regulatorów PID [9, 301], jak i metody sterowania układów nieliniowych zaprezentowane w pracach [60, 124], metodę kontrakcji dynamicznej [50] i metody sterowania predykcyjnego [43]. W strukturze tej wykorzystuje się właściwości sprzężenia zwrotnego, tj. odporność na zakłócenia i niepewność co do modelu oraz możliwość stabilizacji układów niestabilnych [23, 52, 134, 208, 268, 284]. Działanie wyprzedzające (P) oddaje istotę wprowadzenia elementu, który realizując sterowanie w układzie otwartym, generuje sygnał sterujący, zanim się pojawi uchyb konieczny do zadziałania regulatora (R).

Łatwo wykazać, że w przypadku układów liniowych ciągłych, które nie posiadają zer transmitancji w prawej półpłaszczyźnie, w warunkach braku za-

kłóceń istnieje klasa funkcji, dla których możliwe jest sterowanie z zerowym uchybem. Dla zer w prawej półpłaszczyźnie sterowanie cechujące się brakiem uchybu wymagałoby rozpoczęcia w chwili $t = -\infty$. Metody wykorzystujące odwrotną dynamikę pozwalają jednak na praktyczną realizację sterowania znacznie poprawiającego jakość procesów przejściowych [60, 124].

Takie właśnie rozwiązanie zostało wykorzystane do sterowania samolotem bezałogowym [98, 216-218]. Wykorzystując strukturę jak na rys. 3.5, uzyskano funkcjonalność realizacji lotów po zadanych trajektoriach nieliniowych. Wprowadzenie wyłączania warstw zewnętrznych [216] dodatkowo poszerza możliwości sterowania o manewry zadawane przez zmienne stanu niższych warstw. Struktura ta odzwierciedla także istnienie różnych sposobów włączenia się człowieka w proces sterowania lotem samolotu. Do opisu tej właściwości w monografii [188] wprowadzono pojęcie „głębokości działania”.

3.2.4. Model hybrydowy

Po wprowadzeniu do modelu procesu sterowanego elementów binarnych (np. określających aktywność danego sterownika) oraz wielostanowych (np. wybór sposobu pracy systemu sterowania) opis przyjmuje postać modelu hybrydowego (zależności (3.20)), w którym zmienne oznaczone indeksem c są zmiennymi ciągłymi, zmienne oznaczone indeksem b są zmiennymi binarnymi:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= f_c(x_c(t), x_b(t), u_c(t), z(t)) \\ x_b(k) &= f_b(x_b(k-1), u_b(k), x_c(t)) \\ y_c(t) &= g_c(x_c(t), u_c(t), z(t)) \\ y_b(k) &= g_b(x_b(k), u_b(k)) \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Sygnaly ciągłe zostały oznaczone jako funkcje w dziedzinie zmiennej rzeczywistej t , natomiast sygnaly binarne – w dziedzinie zmiennej całkowitej k , takiej że czas odpowiadający każdej z wartości jest określony zależnością $t = k \cdot T_d$ (T_d – okres dyskretyzacji). Zasadniczą różnicą pomiędzy modelem (3.1) a (3.20) jest to, że stany x_b wprowadzają silne nieciągłości w funkcji f_c . W układzie sterowania samolotem o strukturze jak na rys. 3.4 można opisać modelem hybrydowym pracę systemu w różnych trybach. Jeśli stany pracy określają parami rozłączne zbiory wartości sygnalów binarnych S_i , to funkcję f_c zapisuje się następująco:

$$f_c(x_c, x_b, u_c, z) = \begin{cases} f_1(x_c, u_c, z), & \text{dla } x_b \in S_1 \\ f_2(x_c, u_c, z), & \text{dla } x_b \in S_2 \\ \vdots \end{cases} \quad (3.21)$$

Zmiana postaci funkcji f_i (wzór (3.21)) w systemie sterowania może być wywołana:

- przełączeniem trybu pracy – przez binarne sygnały sterujące u_b ,
- zmianą trybu pracy – wynikającą z reakcji na stan x_c .

Stan wewnętrzny części binarnej opisuje procesy, które uzależniają decyzję o zmianie funkcji od obydwu czynników oraz stanu aktualnego.

W systemie automatycznego sterowania, w którym występują zmiany jak w zależności (3.21), istnieje niebezpieczeństwo wprowadzenia niestabilności bądź cyklu granicznego w efekcie zastosowanego sposobu przełączania. Efekt ten może wystąpić mimo stabilności każdego z modeli.

3.3. Opis działania człowieka

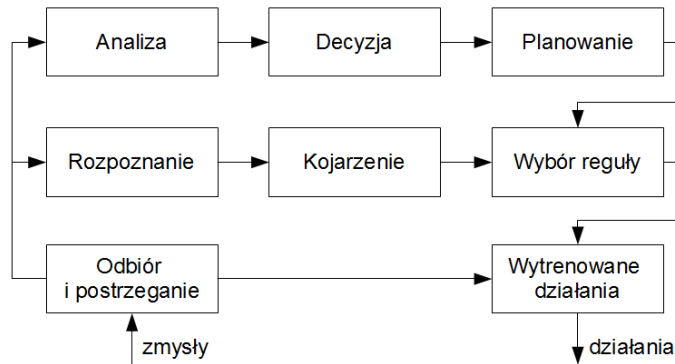
3.3.1. Podstawowe modele działania człowieka

Prowadzenie badań nad systemami sterowania współdziałającymi z człowiekiem wymaga wykorzystania wiedzy dotyczącej samego funkcjonowania człowieka i efektów interakcji pomiędzy człowiekiem a systemami technicznymi. Dzięki rozwojowi nauk medycznych i techniki wspomagającej badania uzyskuje się coraz więcej informacji o tym, jak funkcjonuje organizm człowieka oraz, co istotne dla rozpatrywanych zagadnień, jak wygląda proces interakcji człowieka z otoczeniem. Proces ten obejmuje przetwarzanie informacji sensorycznej przez układ nerwowy do uaktywniania efektorów.

Z potraktowania systemu technicznego jako elementu, który jest narzędziem do realizacji zadań i który powinien być dostosowany do właściwości człowieka, wynika konieczność opisu procesu sterowania i określenia czynników wpływających na ten proces. Już w uproszczonej strukturze przedstawionej na rys. 2.1 zasygnalizowano możliwość różnego sposobu realizacji zadań. Model SRK Rasmussena [232] wyróżnia trzy poziomy działania:

- działanie z wykorzystaniem umiejętności (poziom nawyków [188]) – SBB (*skill-based behaviour*),
- działanie z wykorzystaniem reguł – RBB (*rule-based behaviour*),
- działanie z wykorzystaniem wiedzy – KBB (*knowledge-based behaviour*)

Na rysunku 3.6 zostało przedstawione oryginalne zobrazowanie funkcjonowania poszczególnych poziomów, które tworzą strukturę warstwową. Najniższy poziom to realizacja prostych, wyuczonych czynności, kolejny to wykorzystanie faktów nabytych w efekcie doświadczenia i nauki schematów podejmowania decyzji, natomiast poziom wiedzy wiąże się z umiejętnością wnioskowania [99, 100].



Rys. 3.6. Poziomy działania (na podstawie pracy [232])

Dla umiejętności (*skill*) działanie jest znaną reakcją w aktualnym stanie obiektu i to najczęściej reakcją bezpośrednią na otrzymywane bodźce. Nie ma zatem etapów pośrednich podejmowania decyzji (brak lub znaczna redukcja etapów związanych z analizą informacji i wyborem sposobu działania). Część działań na tym poziomie może być realizowana całkowicie poza świadomością, będą więc wykonywane z największą szybkością.

Realizacja reguł (*rule*) wymaga analizy stanu, często klasyfikacji. Efektem jest wybór działania wynikającego z aktualnego stanu – decyzja, jakie działanie podjąć, wiąże się bezpośrednio z wynikiem analizy informacji. Reguły są zawarte w pamięci proceduralnej. Poziom reguł obejmuje także czynności definiowania zadań i procedur działania. Jego inne określenie [99, 100] – doświadczenie – odzwierciedla, że umiejętności na tym poziomie człowiek nabywa w efekcie szkolenia.

W przypadku działań wymagających wykorzystania wiedzy proces decyzyjny jest najbardziej złożony. Obejmuje poszukiwanie rozwiązania i ocenę spodziewanych efektów działań. Uwzględniając różne zdolności człowieka, należy stwierdzić, że działania i decyzje oparte na wiedzy mogą być realizowane na wiele sposobów, a zarówno efekt, jak i szybkość reakcji na zaistniałą sytuację zależą od wielu czynników. Niezależnie jednak od sposobu realizacji działania poziom wiedzy jest związany ze zrozumieniem procesów zachodzących podczas sterowania i w efekcie kształtuje sposób działania na niższych poziomach.

Inne spojrzenie na działanie człowieka wynika z przedstawienia procesu sterowania jako procesu przetwarzania informacji. W zależności od sposobu konstruowania tego modelu może być on odwzorowaniem struktur fizjologicznych bądź może się składać ze struktur hipotetycznych, odpowiedzialnych za realizację określonych etapów przetwarzania informacji. Mimo że współczesne badania umożliwiły określenie położenia w mózgu obszarów uczestniczących w realizacji określonych czynności, to nadal podstawową trudnością w konstruowaniu modeli fizjologicznych jest brak dostatecznie dokładnego modelu

najważniejszego elementu tego procesu. Modele psychologiczne, zawierające hipotetyczne struktury znacznie lepiej tłumaczą przetwarzanie informacji przez człowieka.

Proces przetwarzania informacji przez człowieka jest dzielony na etapy, których rozróżnienie wynika z założeń przyjętych podczas tworzenia modelu. Dwa etapy: odbiór informacji realizowany przez receptory i ośrodki w mózgu z nimi związane (recepcja i percepcja) oraz realizacja działania przez efekторы są wspólne (choć często różnie nazywane) dla wszystkich modeli.

Etap pierwszy to detekcja bodźca, na który są czułe określone receptory. Sam bodziec może (lecz nie musi) przynosić informację, np. pojawienie się intensywnego światła można traktować jako przekaz informacji, lecz obraz otoczenia w ogólności zawiera informacje, które na poziomie receptorów nie są jeszcze dekodowane.

Percepcja jest procesem przetwarzania na poziomie ośrodków związanych ze zmysłami. Przykładowo, w ośrodku wzrokowym następuje wykrywanie istotnych cech obrazu. Może już zostać odebrana informacja, taka jak szybkość ruchu, orientacja przestrzenna obiektów czy pojawienie się nowego obiektu. O ile recepcja jest procesem bezwolnym, to percepcja wiąże się z aktywnym uczestnictwem ośrodków analizujących informację na poziomie sensorycznym.

Dalsza analiza pozwala na odbiór informacji, która jest złożeniem cech prostych oraz syntezy wielosensorycznej. Na tym etapie jest odbierany przekaz kodowany w postaci tekstu, a w ogólności zapamiętane wzorce są wykorzystywane do określenia znaczenia przekazu. Efektywność i wyniki analizy zależą zarówno od sprawności mechanizmów przetwarzających, zawartości pamięci (w tym modeli wewnętrznych), jak i od różnych czynników wpływających na działanie umysłu.

W procesie sterowania systemami technicznymi człowiek wykorzystuje głównie zmysł wzroku, czyli najbardziej zaawansowany kanał odbioru informacji z otoczenia, który ukształtował takie umysłowe mechanizmy przetwarzania informacji, jakimi są procesy porównywania wzorców i przetwarzanie informacji w formie obrazów zawierających zarówno odwzorowanie rzeczywistości, jak i wyobrażenia.

Wykorzystanie pozostałych zmysłów zależy od właściwości procesu sterowanego i zastosowanych urządzeń. Zmysł słuchu pozwala np. na odbiór stanu pracy zespołu napędowego. Zmysł równowagi ma istotne znaczenie przy sterowaniu samolotami oraz aparatami pływającymi i jeżdżącymi, gdy sterowanie odbywa się przez załogę znajdującą się wewnątrz.

Na szczególną uwagę zasługują receptory siły oraz proprioceptory, gdyż przekazują informacje pozwalające wykonywać czynności sterujące przez efekторы (ręce, dłonie, palce, stopy, a w niestandardowych rozwiązaniach także przez inne części ciała, np. głowę). Wartość siły działającej na rękę człowieka jest odbierana przez receptory skóry, czyli zmysł dotyku oraz przez odczucie siły i wysiłku mięśni [26, 32]. Siła działająca na rękę (a także inne części ciała) po-

woduje aktywację receptorów skórnych. W zależności od częstotliwości wymuszenia oraz rozkładu na powierzchni różnych typów receptorów (ciałko Meissnera, Paciniego, Ruffiniego, Merkela) intensywność reakcji jest różna. Receptory Meissnera, Paciniego, Merkela reagujące na częstotliwości od ponad 10 Hz do nawet 10 kHz są odpowiedzialne za percepcję właściwości dotykanej powierzchni (kształt, faktura, sztywność). Należy jednak zwrócić uwagę, że próby przekazu informacji przez dotyk wykazują znacznie niższe pasmo. Badania wykonane podczas sterowania nadeżnego [32], w których porównano przekaz w postaci wskazań graficznych i przekaz przez dotyk, pokazują porównywalne, a w wyniku treningu nawet lepsze rezultaty dla przekazu przez dotyk jedynie w zakresie niskich częstotliwości ($< 0,1$ Hz). Dla wyższych częstotliwości przekaz przez dotyk okazuje się zdecydowanie gorszy.

Receptory reagujące przy małych częstotliwościach, czyli wolno adaptujące się receptory Ruffiniego, odpowiadają za percepcję sił reakcji organów sterowych. Ruch jest wykrywany jako zmiana długości włókien nerwowych przez włókienka (proprioceptory). Z kolei zmiana napięcia mięśni, która może wynikać z automatyzmu reakcji układu nerwowego bądź świadomego przeciwdziałania, jest bezpośrednio wykrywana przez receptory Golgiego. Należy jednak zauważyć, że intensywna reakcja włókienek na szybką zmianę długości, która jest związana z automatyczną reakcją przeciwdziałania odpowiednich mięśni w sytuacji, gdy następuje zmiana siły działającej np. na dłoń, może być wykorzystana do przekazywania szybkich sygnałów (m.in. ostrzeżeń).

Do dalszej analizy zostały wykorzystane dwa modele opisujące etapy procesu decyzyjnego:

- OODA (*observation* – percepcja, *orientation* – analiza, *decision* – podejmowanie decyzji, *action* – działanie) [204],
- MGSJ (*monitoring* – monitorowanie stanu, *generating* – propozycje działań, *selecting* – wybór opcji, *implementing* – realizacja podjętej decyzji) [73, 131].

Wymienione etapy procesu przetwarzania stanowią tor główny w strukturze zawierającej sprzężenia zwrotne. Sprzężenia zwrotne ilustrują wpływ podjętej decyzji i realizowanego działania na proces odbioru i przetwarzania informacji, sterowanie procesem odbioru informacji przez mechanizmy analizy oraz wpływ realizowanego działania na kolejne decyzje. Skupienie się na wykonywaniu czynności wynikających z realizacji określonych decyzji, powodujące ograniczenie w pozyskiwaniu i przetwarzaniu informacji, bywa przyczyną przeoczenia zmiany sytuacji.

Większość wymienionych efektów wynika z funkcjonowania mechanizmu uwagi, który umożliwia selektywny odbiór informacji z wielokanałowego źródła, jakim jest system sensoryczny człowieka [194]. Dwie podstawowe funkcje mechanizmu uwagi to osłabianie na etapie recepcji – przez ignorowanie przekazu, lub na etapie percepcji – aktywne osłabianie oraz wzmacnianie [161]. Dzięki tym mechanizmom doświadczony operator skutecznie radzi sobie z nadmiarem

informacji. Mechanizm uwagi podlega jednak także wpływowi czynników zewnętrznych. Nadmierny stres [276, 297] powoduje zawężenie zakresu analizowanych zmiennych. Efekt ten określa się zawężeniem okna uwagi. Czynniki zewnętrzny, będący dystraktorem, może zmieniać ukierunkowanie mechanizmu uwagi utrudniając obserwację [107, 194]. Równocześnie jednak podążanie uwagi za najbardziej znaczącą cechą (np. ruch [2], kolor, intensywny bodziec) pozwala na odpowiednio szybką reakcję na zmianę warunków. Stwierdzono, że procesy odgórne umożliwiają selekcję bodźców, redukując wpływ dystraktorów [159, 308].

W procesie szeregowego przetwarzania informacji o zmiennych stanu mechanizm uwagi jest tym elementem, który decyduje o kolejności i czasie obserwacji poszczególnych interfejsów informacyjnych. Prawdopodobieństwo zwrócenia uwagi na dany obszar zależy od określonego kryterium. Podawane są następujące kryteria [183]:

- według Sandersa częstość obserwacji wskazań ma wynikać z pasma sygnału,
- według Carbonella istotny jest wskaźnik kosztu błędu wynikającego z pominięcia danej wielkości,
- Sheridan proponuje wskaźnik spodziewanego zysku jako czynnik wpływający na decyzję, na co zwracać uwagę,
- model SEEV uwzględnia intensywność przekazu (*saliency*), oczekiwania (*expectancy*), wysiłek (*effort*), wartości (*value*) w formie wzoru:

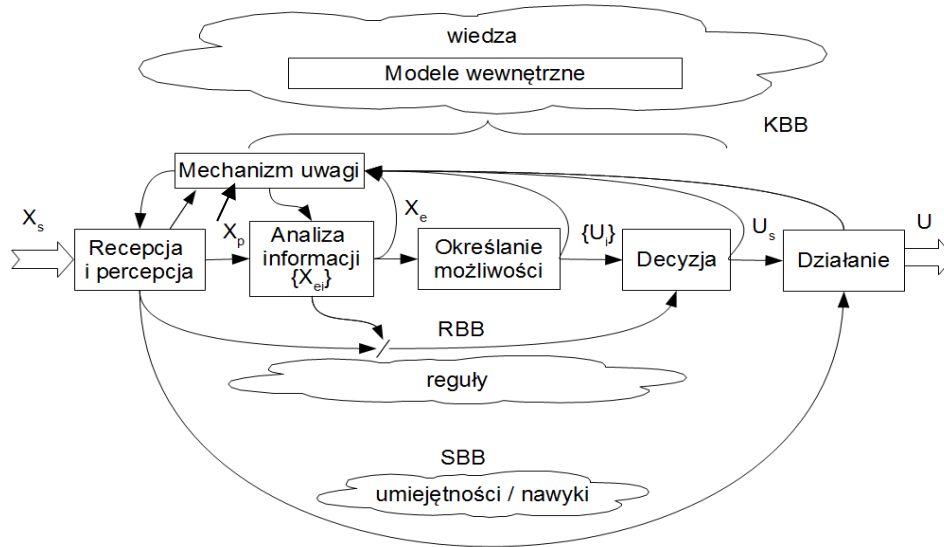
$$P(A) = w_s \cdot S - w_{ef} \cdot EF + (w_{ex} \cdot EX \cdot w_v \cdot V) \quad (3.22)$$

określającego prawdopodobieństwo zwrócenia uwagi na dany obszar (współczynniki w oznaczają wagi poszczególnych składników).

Sprzężenia wynikające z realizacji podjętej decyzji wynikają z konieczności dostosowania odbioru informacji do realizowanego zadania. Znany jest jednak mechanizm działania ludzkiego umysłu, który po podjęciu określonej decyzji lub przyjęciu jednej z możliwych interpretacji napływającej informacji ukierunkowuje się na jej potwierdzenie, często ignorując sprzeczne z tą interpretacją fakty. Procesy poznawcze są zatem modyfikowane przez oczekiwania [72, 119, 194].

Kolejny mechanizm jest związany z aktywnym pozyskiwaniem informacji. Polega na realizacji pewnego eksperymentu angażującego efektor. W wyniku analizy obserwowanych efektów sterowania uzyskuje się poszukiwaną informację [126, 162]. Proces ten jest analogią realizacji identyfikacji podczas sterowania, stosowanej w systemach automatycznego sterowania [296].

Po połączeniu etapów przetwarzania informacji występujących w modelach OODA i MGSI struktura procesu przetwarzania informacji ma postać jak na rys. 3.7 [212].



Rys. 3.7. Struktura przetwarzania informacji przez człowieka i poziomy działania

Pełna struktura reprezentuje działanie na poziomie wiedzy, natomiast pozostałe poziomy są reprezentowane jako pominięcie części etapów. Analiza rozwiązań technicznych w odniesieniu do struktury przetwarzania informacji umożliwia określenie efektów interakcji, z których najważniejszymi są:

- obniżenie lub podniesienie poziomu działania,
- zmiana modelu efektywnego wpływająca na zakres zmiennych niezbędnych do analizy stanu oraz na zależności pomiędzy zmiennymi,
- zmiana modelu efektywnego zmieniająca sposób działania na poziomie SBB,
- możliwość wpływania na podejmowane decyzje przez propozycje oraz recenzowanie sposobów działania,
- przekazanie działań systemom automatyki.

W zadaniach złożonych proces decyzyjny zawiera etapy: analizy priorytetów, planowania działań, oceny działań, monitorowania i weryfikacji działań [231].

3.3.2. Przekaz informacji i świadomość sytuacyjna

Informacja docierająca z otoczenia człowieka jest zawarta w bodźcach odbieranych przez receptory. Dekodowanie przekazu uzyskanego w procesie recepcji zachodzi w ośrodkach mózgowych związanych z poszczególnymi zmysłami i ośrodku łączącym informacje ze zmysłów. Proces percepcji przebiega z wykorzystaniem trwałych, głębokich reprezentacji poznawczych. Tworzenie zapisów reprezentacji poznawczych jest efektem doświadczenia, stąd prawidłowo-

wa interpretacja przekazu sensorycznego wymaga istnienia odpowiedniego wzorca, np. nabytego w wyniku treningu [161, 194].

Podczas realizacji działań na poziomie umiejętności wykorzystywana jest informacja uzyskana na tym poziomie przetwarzania. Informacja ta nie musi znajdować odzwierciedlenia w świadomości. Dla zadania kształtowania współpracy człowieka z systemem sterowania właściwości receptorów oraz procesów percepcji są podstawą do określenia metod wpływania na przekaz informacji przez kształtowanie charakterystyk interfejsów.

Kolejne etapy przetwarzania informacji umożliwiają interpretację przekazu. Wyróżnione na rys. 3.6 procesy rozpoznania i analizy odnoszą się do funkcji, jakie ośrodki realizujące proces myślenia pełnią w zadaniach sterowania i podejmowania decyzji. Nie wnikając w strukturę procesów umysłowych, można stwierdzić, że efekt analizy informacji to wewnętrzny obraz stanu otoczenia człowieka.

Pojęcie świadomości sytuacyjnej jest powszechnie stosowane do opisu obrazu stanu obiektu sterowanego, który jest nazywany modelem sytuacyjnym [72]. Istnieje wiele definicji świadomości sytuacyjnej [30]. Stosowane sformułowania zależą od rodzaju zadań, w których to pojęcie jest wykorzystywane. W definicji świadomości sytuacyjnej podanej przez M. Endsley określono, że jest to percepcja stanu otoczenia w czasie i przestrzeni, analiza znaczenia i przewidywanie stanu przyszłego (*the perception of the elements of environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future* [71]).

Znaczenie problematyki świadomości sytuacyjnej wiąże się z rozwojem techniki prowadzącym do powstania społeczeństwa informacyjnego. W okresie, kiedy podstawowym wyzwaniem było dostarczenie odpowiednich informacji, czyli istotą działań badaczy i konstruktorów była sama konstrukcja urządzeń pomiarowych, transmitujących i prezentujących dane, nie podejmowano zadań, w których pojawiłoby się zagadnienie świadomości sytuacyjnej w obecnym kształcie. Dopiero w wyniku rozwoju techniki, zarówno z zakresu urządzeń technicznych, jakimi steruje człowiek, jak i urządzeń wprowadzanych celem zapewnienia współpracy człowieka z systemami przez niego sterowanymi, nastąpiło znaczne zwiększenie strumienia informacji opisującego sterowany obiekt. Postawienie pytania o to, jakie informacje są potrzebne do realizacji określonego zadania przy istniejących ograniczonych umiejętnościach i możliwościach człowieka, spowodowało, że określenie świadomości sytuacyjnej nabrało istotnego znaczenia.

Wyróżniane są trzy poziomy świadomości sytuacyjnej, określające poziom zrozumienia znaczenia odebranej informacji dla realizowanego zadania [75]. Dodatkowo proponowany jest poziom opisujący własną ocenę jakości odwzorowania, określane pojęciem metaświadomości [112]. Definicje poziomów świadomości sytuacyjnej są zatem następujące:

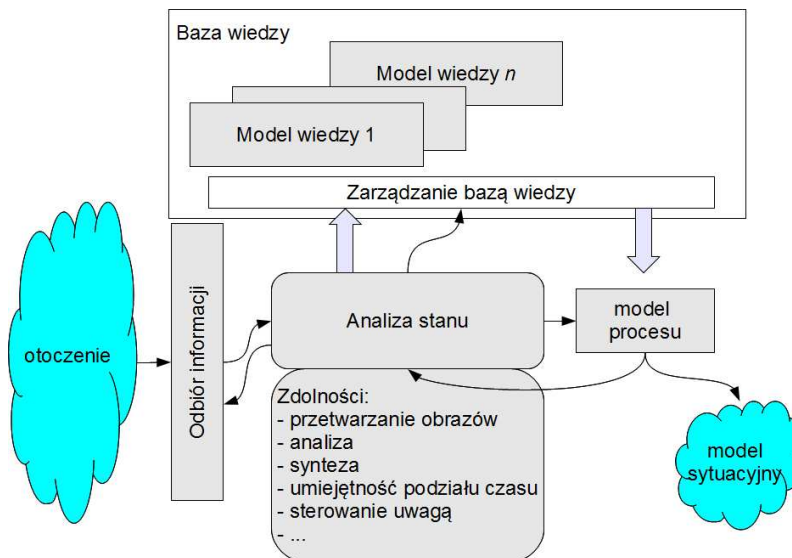
- 1) SA1 – odbiór informacji z otoczenia,

- 2) SA2 – określenie znaczenia i interpretacji informacji dla aktualnej sytuacji,
- 3) SA3 – przewidywanie przyszłych skutków,
- 4) SA4 – własna ocena uzyskiwanej świadomości sytuacyjnej.

Zgodnie z modelem informatycznym analizator wektora stanu porównuje obraz stanu uzyskany z centralnego układu informatycznego (CUI) z wzorcami przechowywanymi w pamięci (faktami) lub przy braku faktów uruchamia proces wnioskowania [100]. Wiedza z zakresu analizy stanu to modele otoczenia, czyli reprezentacje wewnętrzne określonych obiektów bądź klas obiektów oraz, według teorii ekologicznej Gibsona, modele procesów związanych z ich działaniem i używaniem [194].

Model sytuacyjny jest wynikiem interpretacji odbieranego stanu z wykorzystaniem zastosowanego modelu wiedzy. Modelowanie wewnętrzne jest ważnym procesem poznawczym. Można je uznać za odpowiednik metod symulacyjnych stosowanych w technice, jednak z zastrzeżeniem różnic w sposobie przetwarzania człowieka (przekształcanie obrazu, wnioskowanie z wykorzystaniem reguł, wykorzystanie pojęć o charakterze rozmytym, kojarzenie faktów oraz podobieństw itp.) i komputerów (obliczenia i wnioskowanie opierające się na ścisłych zależnościach pomiędzy zmiennymi).

Na rysunku 3.8 została zaprezentowana struktura, w której układ analizy stanu dokonuje porównania stanu ze stanem modelu procesu, wybiera model procesu adekwatny do obserwowanych efektów oraz tworzy nowe modele wiedzy. Rozróżnienie modelu sytuacyjnego od modelu procesu obrazuje dwa ele-



Rys. 3.8. Tworzenie modelu sytuacyjnego

menty obrazu wewnętrznego, czyli zawartość pamięci trwałej, będącą ogólnym opisem rzeczywistości i stan aktualny zmieniający się w wyniku porównania z odbieraną z otoczenia informacją.

Mimo ciągłej weryfikacji poprawność modelu wewnętrznego nie jest zagwarantowana. Ze względu na stosowane uproszczenia oraz generalizowanie istnieje niebezpieczeństwo niepoprawnej interpretacji stanu, którą potwierdzają przypadkowe zdarzenia [20].

Wykorzystanie modelu procesu dla poszczególnych poziomów jest różne. Poziom SA1 można uznać za niezbędny do realizacji działań na poziomie umiejętności oraz częściowo reguł, a zatem interpretacja informacji sprowadza się do prawidłowej percepcji. Jednak wykorzystanie modelu procesu może poprawić jakość przekazu dzięki uzupełnieniu brakujących informacji przez estymatory wykorzystujące odpowiedni dla realizowanego zadania model procesu.

Na poziomie SA2 dokonuje się interpretacji stanu, co jest możliwe jedynie po przyjęciu określonego modelu procesu. Prawidłowa interpretacja stanu jest więc uzależniona od zastosowania adekwatnego do sytuacji modelu i poprawności procesu wnioskowania. Jeśli obiekt sterowany jest opisany modelem hybrydowym (3.20) i (3.21), prawidłowa interpretacja stanu musi uwzględniać tryb, w jakim się znajduje system automatycznego sterowania (*mode awareness*).

Tryb, w jakim się znajduje system, określa sposób interpretacji otrzymywanych informacji. Podczas realizacji sekwencji sterujących istotne są szczególnie: etap realizacji i poprawność reakcji systemu. W takich przypadkach brak świadomości sytuacyjnej jest często wynikiem błędów klasyfikowanych w zakresie pamięci przyszłych działań – pamięci prospektywnej [63, 121, 197]. Zawartość pamięci prospektywnej jest aktywowana przez własny mechanizm oceny czasu, zewnętrzne bodźce, pozycję czynności w sekwencji. Mechanizmy te mogą być zaburzone zdarzeniami, dodatkowymi działaniami niestandardowymi, brakiem typowo występującej wskazówki czy pomyleniem sekwencji z inną. Istnienie w przekazie wskazówek informujących o aktualnym trybie odciąża pamięć i zmniejsza prawdopodobieństwo błędów.

Na poziomie SA3 model procesu jest wykorzystywany do przewidywania przyszłych skutków wynikających z aktualnego stanu. Ich powodem są zmiany stanu opisane np. modelem (3.1), na które mają wpływ działania człowieka. Stąd proces podejmowania decyzji jest uznawany za jeden z czynników kształtujących świadomość sytuacyjną [30].

Prawidłowość oceny własnej świadomości (SA4) umożliwia, w razie stwierdzenia braków, uruchomienie procesów poznawczych i pozyskanie brakujących danych.

Zdolności, które są wymagane do uzyskania prawidłowej świadomości sytuacyjnej, zostały określone na potrzeby selekcji kandydatów na pilotów (np. test WOMBAT [84, 198, 199, 238, 239]), kontrolerów ruchu lotniczego (np. test opracowany przez EUROCONTROL [321]) oraz osób, których działania zawodowe polegają na sterowaniu złożonymi procesami dynamicznymi. Są nimi [72]:

- ogólny poziom inteligencji,
- zdolność przetwarzania obrazów,
- zdolność podziału czasu,
- szybkość przetwarzania informacji,
- skoordynowanie procesów percepcji i procesów motorycznych,
- pojemność pamięci roboczej.

Dodatkowymi czynnikami wpływającymi na świadomość sytuacyjną są: oczekiwania, modele mentalne, schematy, stres, obciążenie, złożoność samego zadania, jak i złożoność struktury otoczenia, wykorzystywane interfejsy i automatyzacja [75].

Istnieje możliwość poprawy osiągniętej świadomości sytuacyjnej przez trening nakierowany na procedury i wiedzę [198]. Także sam proces nabywania doświadczenia powoduje poprawę uzyskiwanej świadomości sytuacyjnej, redukując negatywny wpływ czynników rozpraszających oraz kompensując ograniczenie pojemności pamięci roboczej [90].

Prezentacja informacji

W uzyskaniu odpowiedniej świadomości na poziomie SA1 uczestniczą bezpośrednio następujące zmysły: ośrodek równowagi pilota i kierowcy pojazdu, słuch, wzrok odbierający obraz otoczenia oraz receptory sił i proprioreceptory. Dostarczają one informacji pomocnej do określenia stanu obiektu sterowanego i jego otoczenia. Brak tego przekazu, na co zwracają uwagę operatorzy systemów bezzałogowych [47], powoduje, że sterowanie aparatami bezzałogowymi musi być realizowane w nieco inny sposób niż przy sterowaniu z pokładu samolotu czy śmigłowca.

Współcześnie, poza klasycznymi wskaźnikami indywidualnymi, jest do dyspozycji wiele rozwiązań z zakresu dostarczania informacji, takich jak [22, 130, 150, 174, 191, 226, 242]:

- wskaźnik wielofunkcyjny – prezentujący wiele informacji w postaci wskazań analogowych, numerycznych, znakowych, symbolicznych itp.,
- prezentacja projekcji 3D i wskaźnik tunelowy,
- wskaźnik przezierny – nakładający obraz syntetyczny na obraz otoczenia,
- syntetyczny SVS (*Synthetic Vision System*) i wzmocniony (*enhanced vision*) obraz otoczenia – prezentujące obraz generowany komputerowo z wykorzystaniem informacji z różnych układów optycznych, termowizyjnych i radarowych,
- prezentacja 4D – polegająca na zobrazowaniu z wykorzystaniem projekcji 3D położenia obiektów oraz ich przewidywanych trajektorii [13],
- wskaźniki z nierealistycznym zobrazowaniem (*nonveridical display*) [141].

Możliwe jest także wykorzystanie innych zmysłów: słuchu – komunikaty głosowe, komunikaty werbalne; siły reakcji – odtworzenie reakcji sterów w sys-

temach pośredniego sterowania [1, 88, 178], przekaz ostrzeżeń i informacja o poprawnym sposobie sterowania [88, 140], receptorów dotyku – przekaz ostrzeżeń [246], włączenie w wirtualną rzeczywistość [336].

Dla klasycznych sposobów zobrazowania opracowano zalecenia i normy [302, 324, 325]. Kształtowanie interfejsu generowanego komputerowo obejmuje wiele zagadnień, które powinny być przedmiotem badań naukowych dotyczących wpływu na proces sterowania przez człowieka. Spodziewanym efektem takich badań są wskazania co do przetwarzania informacji przez system, kształtowania formy przekazu i łączenia wielu informacji w interfejsie informacyjnym. W zależności od formy prezentacji zmienia się sposób działania człowieka podczas pozyskiwania informacji. Pilot zamiast obserwacji kolejnych przyrządów [328] ocenia stan na podstawie obrazu i zmian w obrazie wskaźnika wielofunkcyjnego. Zmiana obrazu nie musi skutkować prawidłowo świadomością wartości wielkości obserwowanych. Taki przekaz usprawnia zwykle działanie na poziomie umiejętności. Dodatkowe elementy w przekazie, takie jak prezentacja ograniczeń i przewidywanego stanu, redukują zaangażowanie zasobów potrzebnych do uzyskania odpowiedniej świadomości sytuacyjnej na poziomach SA2 i SA3.

Zagrożeniami przy bezkrytycznym stosowaniu nowych form prezentacji jest umieszczanie zbyt wielu informacji, nieodpowiedni dobór kolorystyki i kształtów, co powoduje znaczne zwiększenie strumienia informacyjnego i możliwość niepoprawnej interpretacji stanu.

Ostrzeżenia i alarmy

Przekaz informacji zawierającej ocenę stanu oddziałuje na realizację zadania oraz wpływa na świadomość sytuacyjną. Możliwe są zarówno pogorszenie świadomości sytuacyjnej, gdy reakcja jest odruchem, jak i poprawa przez ukierunkowanie mechanizmu uwagi na pozyskanie informacji wcześniej przeoczonych i dodatkową analizę informacji. Przekaz informacji w sytuacji niepoprawnej poza wynikiem diagnozy stanu może zawierać propozycję rozwiązania, co sugeruje podjęcie działań.

Błędna ocena sytuacji przez system alarmowy, który z zasady wysyła sygnały, wykorzystując znaczące cechy przekazu, przejawia się zwiększeniem poziomu obciążenia oraz przy:

- występowaniu fałszywych alarmów – negatywnie wpływa zarówno na reakcję na alarmy systemu, jak i na działanie, gdy nie ma alarmów,
- niewykrywaniu części sytuacji alarmowych – nie pogarsza poziomu i szybkości reakcji na stany niepoprawne w porównaniu z brakiem systemu ostrzegającego, pogarsza jednak jakość działania przy braku alarmów [65].

Efekty te wynikają z konieczności analizy informacji sprzecznych, a zatem zaangażowania większych zasobów po stwierdzeniu niskiej wiarygodności systemu alarmowego.

Pomiar świadomości sytuacyjnej

Badanie rozwiązań z zakresu przetwarzania i prezentacji informacji obejmuje określenie jakości świadomości sytuacyjnej. Pomiar świadomości sytuacyjnej należy rozumieć w sensie pomiarów psychologicznych [26, 61, 69]. Wobec istnienia wielu metod pomiaru świadomości sytuacyjnej [30, 61, 128, 173, 243, 244], które w badaniach porównawczych dają różniące się wyniki, trudne jest jednoznaczne określenie, jak należy wykonywać ten pomiar. Można raczej przyjąć, że skuteczność metody pomiarowej w dużym stopniu zależy od specyfiki zadania, którego pomiar dotyczy. Dalej wymieniono znane metody pomiaru świadomości sytuacyjnej.

Metody bezpośredniej oceny SA (*direct experimental method*)

Metody z tej grupy polegają na przerwaniu i zamrożeniu realizowanego testu (*freezing technique*) oraz przeprowadzeniu ankiety mającej ocenić stan świadomości sytuacyjnej operatora. Przykładem testu z tej grupy jest SAGAT (*Situation Awareness Global Assessment Technique*) [70, 72], polegający na przerwaniu eksperymentu, wygaszeniu źródła informacji (ciemny ekran zamiast interfejsów informacyjnych) i zadaniu serii pytań związanych z sytuacją przed przerwaniem eksperymentu. Odpowiedzi na pytania obejmujące wszystkie istotne aspekty są porównywane ze stanem rzeczywistym. Pytania są podawane losowo. Zbiór pytań zawiera zarówno istotne, jak i mniej ważne dla oceny świadomości. Odpowiednie przygotowanie zbioru pytań umożliwia uzyskanie informacji o świadomości sytuacyjnej w różnych perspektywach czasowych (bieżącej, średniej i długookresowej) i dla różnych poziomów. Aby uzyskać statystyczne znaczenie testu, proces próbkowania powtarza się wielokrotnie.

Problemem jest inwazyjność testu, która znacznie utrudnia zastosowanie go w zadaniach wymagających ciągłości działania człowieka. Istotna dla wiarygodności wyników testu jest możliwość zmiany sposobu postrzegania realizowanego zadania przez uczestnika testu pod wpływem zagadnień zawartych w pytaniach.

Pomiary w czasie rzeczywistym

Ocena bieżącej świadomości sytuacyjnej w trakcie realizacji testu jest atrakcyjna. Uzyskanie informacji pozwalającej na ocenę świadomości sytuacyjnej wymaga zadania pytań i uzyskania odpowiedzi. Pytania te są wprowadzane jako dodatkowe zadanie realizowane równoległe do zadania głównego. Niestety, podstawową wadą jest wysoka inwazyjność.

Podjęmowane są próby realizacji tego typu metod, polegające na prowadzeniu korespondencji z operatorem. Metoda pomiarowa generuje jednak dodatkowe czynności, może więc, redukując dostępne zasoby, prowadzić do obniżenia świadomości sytuacyjnej. Dodatkowo, zadawane pytania nie są obojętne dla mechanizmu uwagi i w efekcie mogą zmieniać sposób działania człowieka. Ten

drugi mechanizm może sztucznie zwiększać poziom świadomości, ukrywając wady badanych rozwiązań.

Ocena subiektywna

Oceny subiektywne polegają na porównaniu wymaganego, dla prawidłowej realizacji zadania, poziomu świadomości sytuacyjnej z poziomem aktualnym. Ocena jest subiektywną opinią samego badanego (*self rating*) bądź innej osoby (obserwator, ekspert).

Wiarygodność własnej oceny poziomu SA jest jednak kwestionowana, ze względu na problem określenia braków w świadomości sytuacyjnej. Zwykle ludziom trudno jest stwierdzić istnienie czegoś, co nie istnieje w świadomości. Można nawet przypuszczać, że znaczny wpływ na własną ocenę ma głównie subiektywna ocena jakości wykonywanego zadania.

Innym podejściem do subiektywnej oceny świadomości jest określenie wskaźników, które nie są związane z istotą realizowanego zadania. Przykładem takiej metody oceny subiektywnej jest SART (*Situation Awareness Rating Technique*), w której osoba testująca ocenia trzy zbiory wskaźników:

- wymaganie,
- dostępność,
- zrozumienie sytuacji.

Do grupy wskaźników wymagania należą oceny niestałości, zmienności i złożoności sytuacji. W zakresie dostępności określa się wolne zasoby mentalne, poziom pobudzenia, poziom koncentracji i podział uwagi. Te wskaźniki mają odzwierciedlać sposób działania mechanizmów związanych z uzyskiwaniem modelu sytuacyjnego. Do zakresu zrozumienia należą oceny jakości i ilości informacji oraz stopnia znajomości sytuacji. Każdy z czynników jest oceniany w 7-stopniowej skali [72, 245]. Wynikiem pomiaru mogą być zarówno trzy wartości, jak też wartość łączna.

Ocena obserwatora zewnętrznego, mającego wiedzę o prawidłowym sposobie działania podczas realizacji danego zadania, stanowi kolejne podejście do zagadnienia oceny świadomości sytuacyjnej. Jest to jednak metoda silnie uzależniona od umiejętności obserwatora i jej poważną wadą jest niski poziom obiektywizmu. Wynika to z faktu, że na zachowanie osoby obserwowanej mają wpływ dodatkowe czynniki, a nie tylko sama świadomość sytuacyjna. Czynniki te mogą zarówno maskować braki świadomości sytuacyjnej, jak i powodować błędne działania przy wysokim poziomie świadomości sytuacyjnej.

Warto jednak zwrócić uwagę, że właśnie taki sposób oceny jest najczęściej wykorzystywany w procesie szkolenia oraz egzaminowania, kiedy instruktor, obserwując ucznia, ocenia jego umiejętności obejmujące wiele czynników, m.in. także świadomość sytuacyjną.

Wskaźniki procesów wewnętrznych (*process indices*)

Wskaźniki procesów wewnętrznych związanych z uzyskiwaniem świadomości sytuacyjnej można traktować jako techniczną realizację obserwatora. Najczęściej wykorzystywanym wskaźnikiem jest ruch gałek ocznych. Metoda ta obrazuje zewnętrzne procesy zdobywania informacji. Z pewnych przesłanek, takich jak czas odczytu i częstość odwoływania się do określonego wskaźnika, jest możliwe określenie pewnych właściwości badanych urządzeń. Urządzeniem wykorzystywanym w pomiarach jest okulometr.

Wykorzystanie innych wskaźników (jakość realizacji, poziom obciążenia)

Wskaźniki jakości realizacji w zadaniach wymagających poprawnej świadomości sytuacyjnej są miarą pośrednią. Istnieją także modele wiążące poziom obciążenia mentalnego i świadomość sytuacyjną [109].

Wykorzystanie jako wskaźnika oceny jakości realizacji bądź poziomu obciążenia umożliwia uzyskanie wiarygodnego wyniku przez procedurę porównawczą. Badanie polega na porównaniu jakości realizacji zadania lub poziomu obciążenia, jaki jest związany z realizacją zadania testowego dla konfiguracji badanej i konfiguracji referencyjnej. Poprawa jakości oraz zmniejszenie wysiłku świadczą o poprawie świadomości sytuacyjnej.

Ważne jest w takim teście, aby jednoznacznie określić, czy wprowadzana zmiana wpływa na świadomość sytuacyjną, czy jedynie na działania bieżące. Zadania uwarunkowane przez jakość świadomości sytuacyjnej zawierają typowe elementy oceny poprawności stanu i wymagają podejmowania decyzji. W szczególności efektywność kontroli ruchu lotniczego jest skorelowana ze świadomością sytuacyjną na poziomach SA2 i SA3 [198].

3.3.3. Poziom umiejętności – sterowanie bieżące

Działania człowieka na poziomie umiejętności są najbardziej zbliżone do działania regulatora. Jednym z modeli człowieka opracowanym w latach 60. i 70. XX w. jest model regulatora adaptacyjnego [176, 177], opisanego transmitancją widmową:

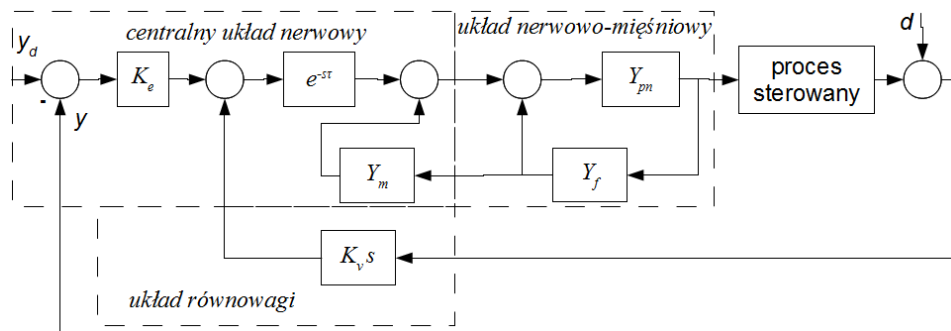
$$H_p(j\omega) = K_p e^{j\omega\tau} \frac{T_L j\omega + 1}{T_I j\omega + 1} \frac{K_T \left[\frac{a_\tau}{\sigma_T} \right]}{\left(\frac{j\omega}{\omega_N} \right)^2 + \frac{2\zeta j\omega}{\omega_N} + 1} \frac{1}{T_{N1} j\omega + 1} \quad (3.23)$$

W modelu uwzględniono łącznie właściwości układu nerwowego i mięśniowego jako inercję T_{M1} oraz element oscylacyjny o pulsacji własnej ω_N , dla którego określa się funkcję wzmocnienia $K_T \left[\frac{a_\tau}{\sigma_T} \right]$ zależną od ilorazu progu

detekcji a_T i wartości σ_T . Opóźnienie τ przetwarzania informacji uwzględnia czas propagacji sygnału przez układ nerwowy (obejmuje przepływ i przetwarzanie sygnału; przyjmuje się wartości w populacji z przedziału 0,1-0,2 s). Ze względu na brak pobudzenia w zakresie wyższych częstotliwości część oscylacyjna modelu jest najczęściej pomijana. Trzy parametry: wzmocnienie K_p , stała czasowa T_I oraz czas wyprzedzenia T_L są związane z właściwościami adaptacyjnymi człowieka. Na podstawie eksperymentów stwierdzono, że człowiek dostraja te parametry tak, jak tego wymagają kryteria teorii sterowania [23, 177]. Z badań przeprowadzonych przy zmiennych parametrach procesu sterowanego wynika, że adaptacja do zmiany procesu na trudniejszy do sterowania następuje szybciej niż gdy jest możliwe zmniejszenie mobilizacji [25, 224]. Adaptacja do zmian opóźnienia jest procesem długotrwałym (kilkadziesiąt godzin) [83].

Parametry modelu (wzór (3.23)) zmieniają się podczas wykonywania zadania dodatkowego [158], przy czym istotne są również priorytety ustalone przez operatora dla poszczególnych zadań [305]. Stwierdzono także, że zmiany modelu przy zmianie warunków zadania zależą w znacznym stopniu od cech indywidualnych człowieka [18].

Uwzględnienie faktu wykorzystywania przez człowieka wielu wielkości, poza uchybem regulacji, prowadzi do modelu o strukturze zawierającej dodatkowe sprzężenia (rys. 3.9). Kolejne informacje wpływające na proces sterowania są dostarczane przez ośrodek równowagi [111, 312, 313] i ośrodek analizy ruchu obrazu [273]. Wpływ na proces sterowania ma także łączna dynamika interfejsu sterującego (np. dźwazka) i ręki [154, 156].



Rys. 3.9. Struktura modelu człowieka (na podstawie pracy [111])

Model (3.23) nie odzwierciedla w pełni sposobu działania człowieka, co uwidacznia się jako różnice pomiędzy modelem a wynikami eksperymentów, nazwane pozostałością (*remnant*). Na podstawie wyników współczesnych badań można opisać inne formy aktywności człowieka w procesie sterowania.

Sterowanie w układzie otwartym umożliwia realizację czynności bez kontroli efektów. Wykorzystanie sekwencji sterujących (*motor program* [175]),

będących modelem odwrotnym procesu sterowanego przechowywanym w pamięci działań, jest sposobem sterowania po treningu. Taki sposób sterowania wyróżnia więc doświadczonego operatora, podczas gdy nowicjusze reagują głównie na uchyb [125, 126]. Wysoki stopień wytrenowania może jednak powodować brak odporności na zaburzenia, które nie są znane. Przykładem jest efekt gorszych wyników mistrzów w stosunku do zawodników przeciętnych, jeśli konkurencja odbywa się w znacznie różniących się od typowych warunkach oraz gorsze wyniki doświadczonych operatorów po modyfikacjach zmieniających charakterystyki systemu sterowanego [126]. Wykorzystywanie modeli umożliwia także przewidywanie efektu zakłócenia i jego efektywną kompensację w sytuacji opóźnienia sygnału sprzężenia zwrotnego [125].

Zobrazowanie aktywności mózgu podczas realizacji sterowania pozwoliło zaobserwować tworzenie się ośrodków będących sterownikami dla konkretnych czynności, a także wykorzystywanie istniejących ośrodków dla nowych czynności. Zidentyfikowane zostały dodatkowo dwa typy modeli:

- modele działania obiektów (*forward*),
- modele odwrotne (*inverse*) sterowania obiektami.

Modele odwrotne określają sposób wykorzystania danych przedmiotów, czyli służą do opracowania rozkazów dla mięśni, aby uzyskać założony efekt działania. Modele te są nabywane w toku uczenia i pozwalają na sprawne, na poziomie umiejętności, działanie z wykorzystaniem znanych bądź podobnych obiektów. Określenie „modele” jest uzasadnione możliwością generowania działania przez kilka współpracujących ze sobą ośrodków, z których każdy posiada zdolność realizacji innej czynności. Równocześnie stwierdzono, że w wyniku powtarzania nowej czynności w mózgu tworzy się wyspecjalizowany dla niej ośrodek [120]. W procesie sterowania ruchem efektorów (kończyn, gałki ocnej itd.) stwierdzono wykorzystywanie obydwu rodzajów modeli [175].

Łącząc sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym ze sterowaniem wyprzedzającym, można stosować dwie taktyki:

- regulator kompensuje błędy występujące przy sterowaniu w układzie otwartym,
- sterowanie w układzie otwartym jest wykorzystywane pomocniczo w stosunku do sterowania ze sprzężeniem zwrotnym.

Pierwsza taktyka została stwierdzona dla dwóch sposobów sterowania: sterowania wyzwalanego [29, 87, 97] oraz sterowania typu „działaj i czekaj” (*act and wait*) [47, 122, 123]. Obydwie polegają na formowaniu działania sterującego na podstawie uchybu w chwilach, które określa układ oceny na podstawie odchylenia stanu aktualnego od stanu przewidywanego bądź detekcji zdarzenia wyzwalającego (stan korygowania błędu). Różnica polega na tym, że podczas sterowania wyzwalanego w okresach pomiędzy korekcjami sygnał sterujący jest modyfikowany na podstawie modelu wewnętrznego, natomiast przy sterowaniu „działaj i czekaj” sygnał ma ustaloną wartość (stan ignorowania błędu). Taktyka

Zaznaczony na rys. 3.10 proces analizy danych należy traktować jako element modyfikujący sposób sterowania przez korygowanie stanu pożądanego w efekcie oceny sytuacji oraz uzupełnianie informacji niedostępnych bezpośrednio.

3.3.4. Sterowanie ze zmianą trybów

Przełączanie trybów sterowania jako jednego ze sposobów sterowania przez człowieka wynika ze spostrzeżenia, że w wielu sytuacjach możliwe jest wyróżnienie kilku trybów sterowania, ogólnie w zależności od stanu, a w szczególności – zależnie od wartości uchybu. Przełączenie trybu sterowania następuje w efekcie oceny stanu procesu sterowanego.

Poza alternatywą „sterować czy nie sterować” istnieje także możliwość, że podczas realizacji procesu sterowania następuje zmiana sposobu działania, polegająca na wyłączaniu regulatorów warstw zewnętrznych w strukturze jak na rys. 3.3 lub 3.5. Podczas sterowania ruchem samolotu będzie to realizacja przez człowieka sterowania na poziomach od stabilizacji orientacji samolotu do pełnego sterownia ruchem na zadanej trajektorii.

W szczególnym przypadku wyróżnione będą dwa tryby sterowania (uogólnienie na wiele trybów jest oczywiste), a czynnikiem decydującym o zmianie trybu jest pewna wielkość ζ , której zależność od uchybu i wartości zadanej określa wzór:

$$\zeta(t) = F_{\zeta}(\varepsilon, y_d)(t) \quad (3.25)$$

w którym ogólnie F_{ζ} jest operatorem o właściwościach:

$$\left. \begin{aligned} F_{\zeta}(\varepsilon, y_d)(t) &\geq 0 \\ \forall \Delta\varepsilon(t) \geq 0, F_{\zeta}(\varepsilon + \Delta\varepsilon(t), y_d)(t) &\geq F_{\zeta}(\varepsilon, y_d)(t) \\ \exists \tau > 0, \forall t > \tau, \varepsilon(t) = 0; \lim_{t \rightarrow \infty} F_{\zeta}(\varepsilon, y_d)(t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

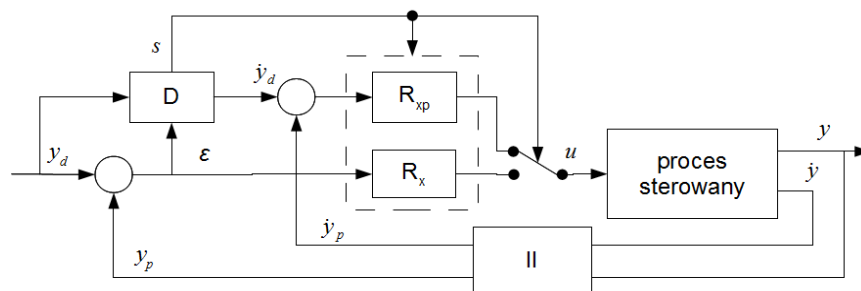
Jeżeli założyć się, że dla małych wartości ζ działanie zgodne z wcześniej zaprezentowanymi modelami jest odpowiednie, to duże wartości parametru ζ wynikają z dużych wartości uchybu, co oznacza, że regulator będzie dawał odpowiednio duże wartości sygnału na wyjściu. Dla modeli nieliniowych nie zawsze jest możliwe (a często jest niebezpieczne) wprowadzenie zbyt dużych wartości sterujących.

Jeśli sygnał sterujący jest fizycznie ograniczony, to dla dużych uchybów przekracza on wartość ograniczenia i następuje utrata sterowności. Tego zjawiska można unikać przez zmniejszenie wzmocnienia regulatora, co ma jednak wpływ na charakterystyki czasowe. Jeśli jednak w efekcie sterowania ze stałą

wartością sygnału sterującego proces zmiany stanu dąży do otoczenia stanu pożądanego, to taki sposób sterowania może być akceptowalny. W otoczeniu stanu pożądanego następuje ponowne przełączenie na działanie regulatora i zmniejszenie wartości sygnału sterującego.

Dla procesów dynamicznych, spełniających warunek (3.19) przynajmniej dla jednej pary zmiennych, może występować ograniczenie wartości pochodnej. Ograniczenie to nie ma charakteru ograniczeń sztywnych jak dla sygnału sterującego, lecz wynika z zależności zmiennych w modelu. Dobrym przykładem jest zależność prędkości kątowej zmiany kursu od kąta przechylenia, która dla małych przechyleń jest z dużą dokładnością liniowa. Wynika to z właściwości funkcji tangens w zależności (3.8). Ze wzrostem wartości przechylenia na podstawie pełnego modelu samolotu łatwo stwierdzić, że zależność nie tylko staje się nieliniowa, ale także błąd tak uproszczonego modelu czyni go nieużytecznym.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że dla dużych odchyłeń kursu niecelowe jest sterowanie ze względu na wartość zmiennej docelowej (tryb y) – sensowniejsze jest sterowanie ze względu na wartość pochodnej tej zmiennej (tryb \dot{y}). Wynika stąd wprost struktura sterownika ze zmianą trybów, jak to zostało przedstawione na rys. 3.11. Element decyzyjny D określa zarówno sposób sterowania, jak i wartość zadanej prędkości. Sygnał s obrazuje proces przełączania źródła sygnału sterującego i przełączania regulatorów.



Rys. 3.11. Struktura układu sterowania ze zmianą trybów

Zaprezentowana struktura obrazuje raczej funkcje (regulatory R_x i R_{xp}) niż rzeczywiste ośrodki mózgowie realizujące zadania regulatorów, chociaż kilka opublikowanych wyników badań potwierdza możliwość lokalizacji w mózgu człowieka ośrodków odpowiedzialnych za sterowanie zgodnie z tym schematem [28, 120].

Na rysunku 3.11, poza funkcjami sterownika, zaznaczono element II. Obrazuje on fakt, że informacje wykorzystywane przez człowieka są odbierane z interfejsów informacyjnych. Odbiór może być bezpośredni – jako odczyt wskazania odpowiedniej wartości, bądź też pośredni – jako wielkość łatwa do

interpretacji i zależna od wartości wykorzystywanej w procesie sterowania (minimalne założenie to monotoniczność zależności wielkości sterowanej od wielkości dostępnej).

Istotnym zagadnieniem jest określenie warunków przełączania pomiędzy trybami. O ile w zadaniach sterowania procesami wolno zmiennymi zmiana trybu może wynikać z analizy stanu tego procesu (czyli można oczekiwać nawet skomplikowanych postaci operatora F_{ξ}), to dla procesów o większej szybkości przełączanie będzie raczej bezpośrednią reakcją na odbierane informacje. Oczywiście szybkość procesu należy określać w odniesieniu do osiągnięć człowieka operatora.

Rozróżnienie względnej szybkości procesu jest istotne dla kształtowania elementów, z którymi człowiek współpracuje, w zakresie możliwości wpływania na działanie człowieka. Przy dużych szybkościach działania należy się spodziewać, że modyfikacja przekazu informacji może bezpośrednio wpływać na decyzje o przełączaniu. W procesach o długim czasie trwania trzeba uwzględnić możliwości analityczne, czyli zdolność przewidywania i wnioskowania o skutkach oraz możliwość detekcji zniekształcenia przebiegów wartości zmiennych i kompensacji tego zniekształcenia.

W zadaniach sterowania procesami wolno zmiennymi możliwe jest określenie procedur sterowania. Jako przykład można podać:

- proces zmiany wysokości lotu – w fazie początkowej w trybie stabilizacji prędkości pionowej, a w fazie końcowej jako przejście do stabilizacji założonej wysokości,
- proces zmiany trajektorii lotu – w fazie początkowej przez lot z kursem zbieżnym do docelowej linii drogi (typową procedurą stosowaną w lotnictwie jest utrzymywanie kursu 30° do linii drogi), naprowadzenie na linię drogi i stabilizację lotu.

Tryby sterowania dla procesów szybko zmiennych zależą od decyzji człowieka podejmowanej w danej sytuacji. Decyzja ta dotyczy kilku parametrów:

- granicy stanów przełączenia z trybu y do trybu \dot{y} ,
- granicy stanów przełączenia z trybu \dot{y} do trybu y ,
- wartości prędkości zmiany stanu w trybie \dot{y} .

Warto przeanalizować szczególną postać przełączanych regulatorów przedstawionych na rys. 3.11. Przy założeniu, że $\zeta(t) = \varepsilon(t)$, wartości decyzyjne dla sygnału uchybu ε będą następujące:

- ε_{dp} – graniczna wartość, poniżej której stosowany jest tryb \dot{y} ,
- ε_{gp} – graniczna wartość, powyżej której stosowany jest tryb \dot{y} ,
- ε_{dx} – graniczna wartość, powyżej której stosowany jest tryb y ,
- ε_{gx} – graniczna wartość, poniżej której stosowany jest tryb y .

Porównanie wartości granicznych wymaga przyjęcia pewnych założeń, które powinny odzwierciedlać sposób działania człowieka. Sensownym postula-

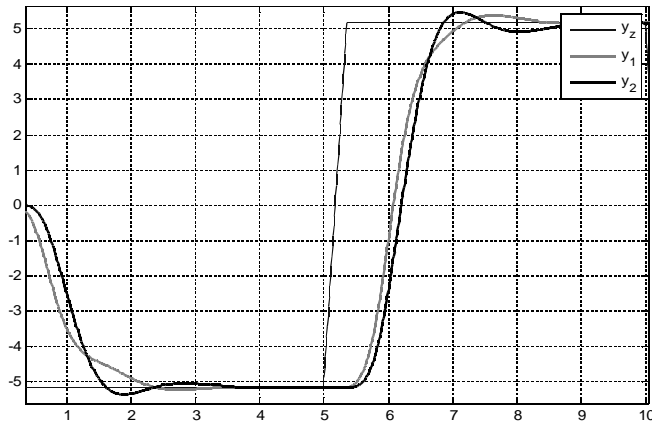
tem jest założenie, że po podjęciu decyzji o sposobie sterowania nie następowała zmiana tej decyzji przy niewielkich zmianach stanu. Stąd wartości graniczne powinny odzwierciedlać efekt histerezy. Prowadzi to do zależności:

$$\varepsilon_{dp} < \varepsilon_{dx} < \varepsilon_{gx} < \varepsilon_{gp} \quad (3.27)$$

Wykonany eksperyment symulacyjny obrazuje różnice pomiędzy sterowaniem z przełączaniem trybów a sterowaniem z regulatorem. Regulator został wykonany jako model liniowy według zależności (3.23), a parametry dobrano z zakresów podawanych w literaturze jako odpowiadające właściwościom człowieka. Obiekt sterowany jest elementem inercyjnym z całkowaniem:

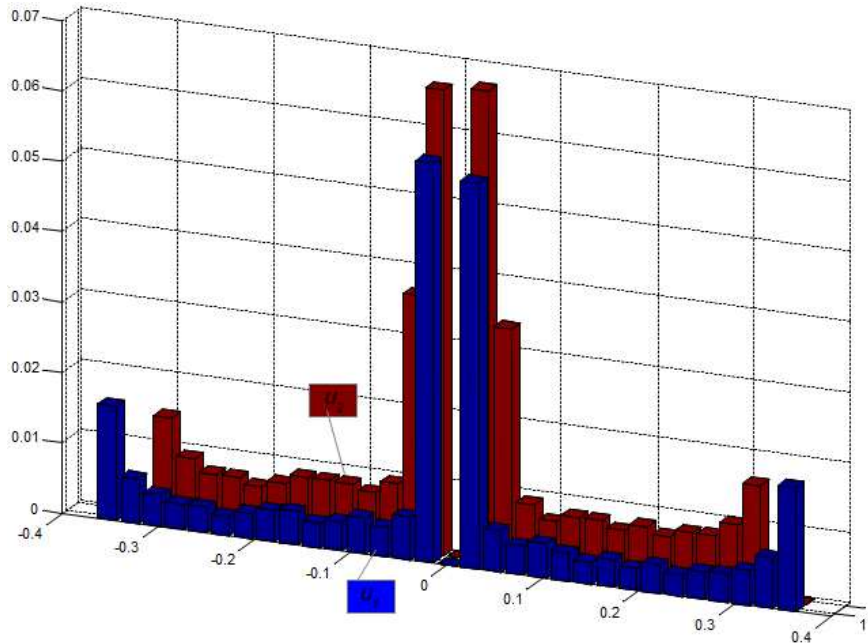
$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} \quad (3.28)$$

Przy identycznych parametrach regulatora charakter zmian sygnałów w procesie sterowania jest różny. Na rysunku 3.12 zaprezentowano charakterystyki czasowe regulacji. W efekcie przełączania nastąpiło przyspieszenie reakcji w początkowej fazie procesu sterowania, natomiast w fazie końcowej – zmniejszenie szybkości, z jaką zmienia się sygnał wyjściowy.



Rys. 3.12. Wartości sygnałów w procesie sterowania; y_z – wartość zadana, y_1 – przy sterowaniu ze zmianą trybów, y_2 – przy sterowaniu przez regulator

Rysunek 3.13 przedstawia unormowane histogramy sygnałów sterujących po usunięciu składnika centralnego, odpowiadającego sterowaniu w stanie ustalonym. Przełączenie trybów spowodowało wykorzystanie większych wartości sterowań, a równocześnie rzadziej były stosowane wartości mniejsze.



Rys. 3.13. Histogramy sygnału sterującego; u_1 – przy sterowaniu ze zmianą trybów, u_2 – przy sterowaniu przez regulator

W trybie sterowania \dot{y} dla obiektu astatycznego (np. zależność (3.28)) możliwe jest uproszczenie, polegające na ustaleniu wartości sygnału sterującego bez kontroli sygnału \dot{y}_p . Doświadczenie człowieka prowadzi do powstania modelu działania, uproszczonego do następujących parametrów:

- wartości zadanej sygnału (lub sygnałów sterujących),
- czasu realizacji tej fazy sterowania – T_y , wynikającego z przewidywania czasu, kiedy konieczna jest zmiana sposobu działania.

Brak konieczności kontroli stanu zwalnia zasoby do realizacji innych zadań.

3.3.5. Czynniki wpływające na sterowanie

Sposób, w jaki człowiek realizuje sterowanie, jest uzależniony od kryterium, które sobie świadomie stawia oraz kryteriów nieświadomych i stanu psychofizycznego. Kryteria jakości sterowania można odnieść do celu sterowania, rozróżniając perspektywę:

- celu strategicznego,
- celu zadania cząstkowego,
- celu sterowania bieżącego.

Czynnikami wpływającymi na wybór kryteriów są: ocena własnych zasobów i umiejętności oraz temperament, wpływ środowiska, uwarunkowania genetyczne, tradycja i kultura [73, 131, 187, 188, 255, 258].

Podczas realizacji zadania zostały wyróżnione tryby sterowania, które można odnieść do perspektywy celu [115, 264]:

- strategiczny – obejmujący długi horyzont czasowy i ogólny cel sterowania,
- taktyczny – oparty na planowaniu,
- oportunistyczny – działanie pod presją czasu i ograniczeń skutkujące niską efektywnością,
- przypadkowy (*scrambled*) – dotyczący sytuacji całkowicie nieprzewidywanych, kiedy reakcja wynika z pośpiechu i niekoniecznie przystaje do sytuacji.

Przykładem wpływu doświadczenia na taktykę są działania pilotów po doprowadzeniu do stanu lotu ustalonego. Osoby z doświadczeniem nie podejmują dalszych działań sterujących, o ile odchylenie od założonego stanu lotu nie stanie się w ich mniemaniu nadmierne. Osoba niedoświadczona często podejmuje działania, aby utrzymać się dokładnie na zadanej trajektorii (jak regulator automatyczny). Tymczasem generuje to wysiłek niewspółmierny do osiąganego efektu.

Stwierdzona powszechna tendencja do realizacji działania na niskim poziomie [300] oznacza, że eksperci starają się podejmować decyzje zgodnie ze znanymi schematami, zatem nawet na poziomach taktycznym i strategicznym może to być jedynie wybór najlepiej dopasowanego modelu działania dostępnego w pamięci, bez próby opracowania nowego, zoptymalizowanego do obecnej sytuacji. Uproszczenie działania prowadzi do automatyzacji procesów umysłowych [26]. Takie procesy są realizowane równolegle (w odróżnieniu od szeregowej realizacji procesów świadomych) oraz cechują się bezwysiłkowością i bezrefleksyjnością. Automatyzacja procesów umysłowych skutkuje zwiększeniem efektywności działania w sytuacjach typowych i obniżeniem świadomości sytuacyjnej, powodując zagrożenia w sytuacjach nietypowych. Działania na poziomie umiejętności silnie wiążą się ze środowiskiem, w jakim są realizowane. Zmiana postaci interfejsów pogarsza efektywność realizacji zadania dopóty, dopóki operator nie nabędzie wprawy w obsłudze. Przykładowo, porównanie nowych interfejsów informacyjnych z tradycyjnymi wykazało lepszą świadomość sytuacyjną dla tych pierwszych w sytuacjach nietypowych oraz gorszą w typowych [33].

Zaangażowanie określonych zasobów w zadanie sterowania nie zależy tylko od decyzji, ale jest modulowane stanem wewnętrznym. Istotnym czynnikiem wpływającym na sposób działania człowieka jest poziom stymulacji i stresu [165, 276]. Prawo Yerksa–Dodsona sformułowane w 1908 r. i wiele późniejszych badań potwierdziło wpływ poziomu stymulacji sensorycznej oraz poziomu napięcia emocjonalnego na sprawność funkcjonowania człowieka. Stwier-

dzono również istnienie optymalnego poziomu stymulacji. Według Terelaka [276] istnieją jednak wewnętrzne mechanizmy regulujące poziom stresu przez stymulację wewnętrzną, co sugeruje, że człowiek w pewnym zakresie zewnętrznego poziomu stymulacji jest w stanie utrzymać maksimum sprawności. O ile jednak poziom pobudzenia wynika z realizacji zadania i otoczenia, w jakim to zadanie jest realizowane, to inne czynniki stresogenne (np. zakłócenia w postaci hałasu, zbyt wysoka lub niska temperatura) oraz różne sposoby radzenia sobie ze stresem w znacznym stopniu wpływają na sposób działania człowieka.

Kolejne, najmniej zdeterminowane, czynniki wpływające na sterowanie to procesy umysłowe, nazwane metamyśleniem [187], z którymi wiąże się fantazję, działania oparte na improwizacji oraz przeprowadzanie eksperymentów w umyśle.

Na poziomie taktyki dysponowania zasobami i stawianego celu sterowania rozróżnia się trzy typy operatorów [266]:

- rozsądny (*wise supervisor*) – nabywając umiejętności, redukuje wysiłek do rozsądnego poziomu, a następnie w miarę dalszego wzrostu umiejętności poprawia wyniki,
- leniwy (*lazy supervisor*) – utrzymuje wynik na akceptowalnym poziomie, a nabywane umiejętności wykorzystuje do obniżenia poziomu wysiłku,
- ambitny (*ambitious supervisor*) – dąży do poprawy wyniku, wykorzystując maksymalnie zasoby i nabywane umiejętności.

Oczywiście przedstawione taktyki dotyczą realizacji jednego zadania. W warunkach realizacji wielu zadań składowych (np. sterowanie wysokością, kursem, kontrola stanu otoczenia i sterowanie aparaturą pokładową), stanowiących łącznie zadanie całościowe, przydział priorytetów do poszczególnych zadań częściowych określa założony poziom realizacji, z którego wynika opis celu sterowania. W układach technicznych jest oczywiste, że cel sterowania definiuje się jako wartości bądź funkcję zmian wartości w zależności od określonej zmiennej niezależnej. Dla tak określonego celu sterowania budowana jest cała teoria układów automatycznego sterowania.

Cel sterowania określany przez człowieka w kategoriach lingwistycznych ma często znaczenie, które można opisać jako rozmyta wartość zadana. Na rysunku 3.14 zadany cel sterowania określono na dwa sposoby:

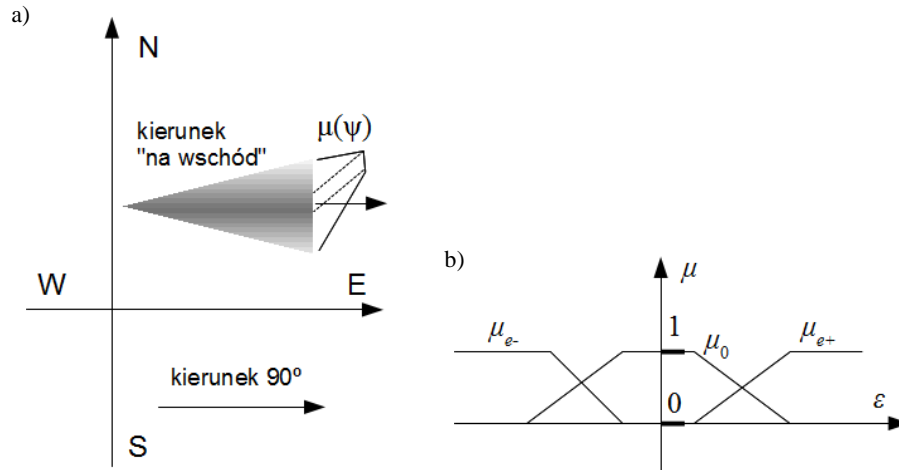
- ściśle jako zadany kurs 90° ,
- zadany w sposób przybliżony jako „lot na wschód”.

Ścisłe zdefiniowanie wartości zadanej implikuje konieczność stabilizacji tej wartości i tłumienia wszelkich odchyłeń. Druga forma przekazu definiuje trzy zbiory kierunków trajektorii, określone przez funkcje przynależności dla uchybu: μ_0 – dopuszczalny, μ_{e-} – ujemny, μ_{e+} – dodatni. Zbiór kierunków trajektorii $\{\Psi: \mu_0(\Psi_z - \Psi) = 0\}$ zawiera wartości, które są uznane za prawidłową realizację

sterowania. Dla wartości w zbiorze $\{\Psi: \mu_0(\Psi_z - \Psi) \in (0,1)\}$ przynależność do zbioru błędu:

$$\mu_e(\varepsilon) = \mu_{e- \cup e+}(\varepsilon) = \mu_{e-}(\varepsilon) + \mu_{e+}(\varepsilon) \quad (3.29)$$

wpływa na intensywność reakcji korygującej. Może to być przykładowo pewna funkcjonalna zależność wzmocnienia regulatora od wartości $\mu_e(\varepsilon)$. W metodach adaptacyjnych wartość ta wpływa jako waga na ocenę jakości sterowania.



Rys. 3.14. Graficzne przedstawienie zadanych wartości: a) zapis kursu zadanego, b) funkcje przynależności dla uchybu sterowania

Przy ocenie konieczności reakcji w środowisku wielozadaniowym dodatkowym czynnikiem jest ocena pilności reakcji. Proces wymagający najpilniejszej reakcji będzie wybierany spośród wszystkich składających się na środowisko wielozadaniowe zgodnie z zależnością (3.30), w której $\mu_{e,i}$ jest określone zależnością (3.29) dla zmiennych w i -tym procesie dynamicznym:

$$r = \max_i \mu_{e,i}(\varepsilon_i) \quad (3.30)$$

Kryterium pilności reakcji pozwala na podejmowanie decyzji o sposobie sterowania przy sterowaniu ze zmianą trybów. Przykładowo, w pierwszej, długotrwałej fazie sterowania (np. naprowadzanie samolotu na wysokość czy kurs) wybierany jest sposób tylko w niewielkim stopniu angażujący człowieka, co pozwala na realizację innych czynności z wyższym priorytetem, aż do momentu, kiedy ocena stanu (wzór (3.30)) wskaże konieczność zmiany trybu.

3.3.6. Poziom obciążenia

Ogólny poziom obciążenia obejmuje kilka składników, wynikających z zaangażowania przez człowieka zasobów, warunków realizacji, czynników zewnętrznych i stanu wewnętrznego. Ograniczając się do zakresu wykorzystania zasobów, poziom obciążenia będzie wynikał z różnicy pomiędzy wymaganiami zadania a środkami dysponowanymi jako własne zasoby człowieka (umiejętności, wiedza, predyspozycje) i zasoby zewnętrzne, w postaci dostępnych środków technicznych i wsparcia ze strony systemów wspomagających oraz współpracowników.

Model zasobów Wickensa (*Multiple Resource Theory*) [304] ilustruje cztery aspekty dotyczące ośrodków przetwarzania (zasobów człowieka):

- modalność: powiązanie zasobów ze zmysłami słuchu, wzroku (ośrodki widzenia centralnego i peryferyjnego),
- rodzaj odpowiedzi: powiązanie z efektorami,
- etapy przetwarzania: percepcja, przetwarzanie w pamięci i generowanie odpowiedzi,
- sposób kodowania: przestrzenny, werbalny.

Model ten pozwala przewidzieć, czy dodatkowe czynności spowodują wzrost obciążenia. Podczas realizacji zadań wykorzystujących wspólne zasoby taki efekt nastąpi. Jeśli zasoby są rozdzielone, istnieje możliwość wykonywania dodatkowych czynności bez przekroczenia poziomu wydolności.

Wyróżniane są dwie podstawowe formy wysiłku wynikające ze sposobu realizacji zadań:

- wysiłek fizyczny,
- wysiłek umysłowy.

Wysiłek fizyczny wynika z konieczności działania (dynamiczny), obejmującego efekторы oraz receptory przy aktywnym zdobywaniu informacji bądź utrzymywania stałej wartości sygnału (statyczny). Wysiłek fizyczny wiąże się głównie z zadaniami realizowanymi na poziomie umiejętności. Wysiłek umysłowy wynika z konieczności przetwarzania informacji, dotyczy więc wyższych warstw działania.

Dodatkowe czynniki można traktować jako elementy modyfikujące zarówno sposób działania człowieka, jak i poziom obciążenia (głównie obciążenia umysłowego). W ocenie poziomu obciążenia w szczególności ujawnia się wpływ oddziaływania otoczenia i warunków realizacji zadania. Z uwzględnienia wpływu realizowanych operacji na efekt działania w zależności od poziomu odpowiedzialności wynika, że nawet proste przekształcenie wydawałoby się w niewielkim stopniu angażujące zasoby, ale wymagane celem zapewnienia bezpiecznego wykonania zadania może być bardzo obciążające. Z kolei skomplikowane zadanie, którego poprawność wyniku ma w ocenie osoby wykonującej to zadanie niewielkie znaczenie, nie musi wywoływać dużego obciążenia. Przyczyną wzrostu obciążenia w zadaniach o wysokim poziomie odpowiedzial-

ności może być oczywiście bezpośrednie zwiększenie zaangażowania zasobów w efekcie dodatkowych analiz skutków decyzji. Wyższe obciążenie może także wynikać z procesów zaburzających działanie ośrodka przetwarzania. Badania z zakresu psychologii wskazują na wpływ różnych dodatkowych czynników, takich jak poziom stresu, poziom wymagań, frustracja i ocena własnej aktywności oraz ogólny stan psychofizyczny człowieka, na poziom obciążenia [276].

4. AUTOMATYZACJA I WSPOMAGANIE CZŁOWIEKA W PROCESIE STEROWANIA

4.1. Poziomy automatyzacji i wspomaganie

Układy automatycznego sterowania zastępują człowieka w procesie sterowania. Wprowadzenie układów automatyki do systemu sterowanego przez człowieka powoduje zmianę modelu efektywnego, co w zamierzeniach ma ułatwiać wykonywanie zadań. Pojęcie poziomy automatyzacji określa zakres zaangażowania człowieka i systemów automatyki w przebieg procesu sterowania. Rozróżnienie jedynie dwóch poziomów: sterowania przez człowieka i sterowania przez automat nie jest odpowiednie do zadań, jakie są realizowane obecnie bądź mogą być realizowane w przyszłości oraz nie odzwierciedla złożoności zagadnienia automatyzacji.

Zastąpienie działań człowieka w określonej warstwie struktury sterownika (rys. 3.3-3.5) przez automat określa poziom kontroli systemu automatycznego. Tak rozumiana automatyzacja zawęża możliwości automatyki do realizacji zmian modelu efektywnego obiektu sterowanego.

Z modelu przetwarzania informacji przez człowieka wynika zastępowanie bądź wspomaganie człowieka w realizacji całego procesu, definiowane dla poszczególnych poziomów automatyzacji [204].

Wykorzystując model MGSI, wyróżniono 10 poziomów automatyzacji. Są to [131]:

- 1) ręczne sterowanie (*manual*) – brak udziału automatyki w procesie sterowania,
- 2) wspomaganie realizacji (*action support*) – w tym trybie na etapie realizacji występuje współdziałanie człowieka z automatyką,
- 3) automatyczna realizacja (*batch processing*) – realizacja jest całkowicie przekazana automatyce,
- 4) wspólne sterowanie (*shared control*) – wspólne czynności dotyczą generowania propozycji działań oraz realizacji,
- 5) wspomaganie decyzji (*decision support*) – realizacja jest zadaniem automatyki, natomiast współpraca występuje na etapie generowania propozycji,
- 6) wspólna decyzja (*blend decision making*) – proces podejmowania decyzji jest realizowany wspólnie,

- 7) sztywny system (*rigid system*) – człowiek dokonuje wyboru z opcji proponowanych przez automatykę,
- 8) automatyczne podejmowanie decyzji (*automated decision making*) – człowiek uczestniczy w procesie generowania możliwości, a automatyka wybiera i realizuje bez jego udziału,
- 9) nadzór (*supervisory control*) – jedynym zadaniem człowieka jest udział w monitorowaniu systemu działającego w sposób autonomiczny,
- 10) pełna automatyzacja (*full automation*) – bez udziału człowieka.

Zadanie monitorowania przy poziomach 2-9 jest realizowane wspólnie, dla poziomów automatyzacji od nr 5 realizacja sterowania jest zadaniem automatyki.

Podana systematyka nie precyzuje możliwości poszczególnych poziomów wspomaganiania danych czynności procesu sterowania, a przecież przy wspólnej realizacji dowolnego z etapów można sobie wyobrazić różne poziomy zaangażowania człowieka i automatyki. Kolejnym brakiem w podanym modelu jest nieuwzględnienie dwóch etapów związanych z tworzeniem przez człowieka wewnętrznego obrazu aktualnego stanu otoczenia, tj. etapu odbioru (recepcji i percepcji) oraz etapu analizy. Inny model poziomu automatyzacji [204] został określony jako poziom współdziałania człowieka z automatyką w zakresie każdego z etapów osobno. Ze względu na różną specyfikę każdego z etapów szczególne definicje poszczególnych poziomów, poza najwyższym (pełna realizacja automatyczna) i najniższym (brak automatyzacji), muszą odpowiadać specyfice realizowanych czynności. Dla procesów podejmowania decyzji wspomaganianych przez komputer podano 10 poziomów:

- 10 – pełna automatyzacja,
- 9 – komputer decyduje, o jakich czynnościach informować człowieka,
- 8 – człowiek ma możliwość zażądania informacji o decyzjach komputera,
- 7 – człowiek jest informowany o każdej decyzji,
- 6 – przed realizacją decyzji człowiek ma możliwość ją zawetować,
- 5 – człowiek musi aprobować decyzje komputera,
- 4 – komputer podpowiada jedną możliwość, a człowiek decyduje,
- 3 – komputer wspomaga proces wyboru możliwych działań, wybierając kilka propozycji,
- 2 – komputer oferuje kompletny zbiór propozycji do wyboru,
- 1 – brak działań komputera.

Wyposażenie systemów automatycznego sterowania w funkcje podejmowania decyzji umożliwia realizację procesu sterowania w pełni autonomicznie. Autonomiczne sterowanie aparatem dotyczy obecnie aparatów kosmicznych [228, 303], bezzałogowych aparatów latających [306, 334] oraz nowych rozwiązań z zakresu ruchu lotniczego w ramach prac nad nowymi systemami transportowymi, takimi jak SATS [237, 267] i SAT [335]. Definicje poziomów autonomii podane w pracy [306] określają funkcje, które powinien realizować system sterowania w zakresie podejmowania decyzji. Wyróżnia się następujące poziomy:

- 1 – jeśli aparat ma możliwość podejmowania decyzji o realizacji manewrów w ściśle określonych sytuacjach, natomiast po zakończeniu manewru zawsze powraca do realizacji planu lotu,
- 2 – jeśli aparat ma możliwość tworzenia własnych punktów planu, aby zrealizować specyficzne zadania,
- 3 – jeśli aparat ma możliwość tworzenia własnego planu lotu zależnie od sytuacji,
- 4 – jeśli aparat tworzy własny plan lotu na podstawie ogólnie zadanego celu misji.

Wynika stąd, że w pełni automatyczną realizację zaprogramowanej w postaci planu lotu misji należy traktować jako poziom zerowy autonomii. Współdziałanie człowieka z systemem autonomicznym odpowiada automatyzacji w procesie podejmowania decyzji (np. w pracy [228] zdefiniowano 8 poziomów w odniesieniu do czynności wyróżnionych w modelu OODA).

Gdy interwencje człowieka w procesie sterowania są nieregularne i dotyczą różnych elementów związanych ze sterowaniem, system powinien móc realizować swoje zadania całkowicie autonomicznie oraz odbierać i wykonywać polecenia w różnych warstwach sterowania. Wynika z tego konieczność adaptacji poziomów automatyzacji i autonomii. Koncepcja *seamless autonomy* [81] zakłada taki sposób działania systemu, że zmiany te nie są dla człowieka zauważalne, a zadania cząstkowe na niskim poziomie są realizowane przez autonomicznego agenta lub agentów. Rolą człowieka jest sterowanie na poziomie określania celów. Takie podejście eliminuje wymagania odnośnie do umiejętności sterownia ruchem aparatu (upraszcza model efektywny) i sprowadza jego obsługę, z punktu widzenia człowieka, do sterowania systemem przenoszonym na pokładzie celem realizacji zadań (np. systemem obserwacyjnym) lub określania optymalnej lokalizacji detektorów przeznaczonych do realizacji celu misji.

Szerszym spojrzeniem na zagadnienie współdziałania człowieka z systemem technicznym jest uznanie systemu jako wspomagającego człowieka. Możliwości wspomagania obejmują [148, 271]:

- wspomaganie umiejętności,
- kompensowanie niedostatków, braków umiejętności, w tym poszerzanie postrzegania poza zakres dostępny dla zmysłów,
- zabezpieczanie przed popełnieniem błędów oraz korygowanie błędów, recenzowanie decyzji,
- działanie automatyczne po stwierdzeniu konieczności reakcji i braku odpowiedniego działania człowieka,
- zmniejszenie wysiłku zarówno fizycznego, jak i umysłowego, wymaganego do realizacji zadania,
- uczenie prawidłowego działania,
- zastępowanie człowieka w procesie decyzyjnym,
- przewidywanie konsekwencji działań.

Tabela 4.1. Wspomaganie działań człowieka

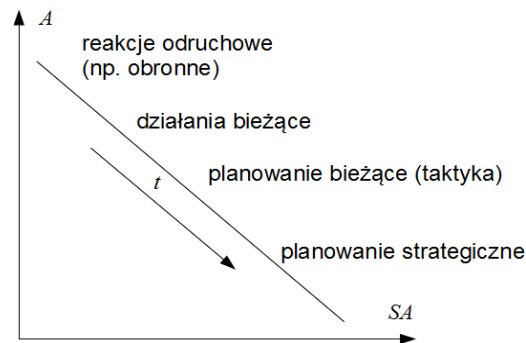
–	Recepcja i percepcja	Przetwarzanie, analiza informacji	Generowanie opcji, możliwych rozwiązań	Podjęcie decyzji	Działanie
Sposoby oddziaływania	<ul style="list-style-type: none"> – forma przekazu – charakterystyka przekazu – wykorzystywane zmysły 	<ul style="list-style-type: none"> – filtracja – prezentacja informacji syntetycznej – prezentacja ułatwiająca analizę 	<ul style="list-style-type: none"> – prezentacja możliwych działań 	<ul style="list-style-type: none"> – ocena proponowanych przez system możliwości – ocena proponowanych przez człowieka możliwości (recenzowanie) – wybór działania 	<ul style="list-style-type: none"> – automatyczna realizacja decyzji – wspomaganie realizacji – kontrola poprawności realizacji
Przykłady realizacji	<ul style="list-style-type: none"> – wykorzystanie sprzężenia zwrotnego w aktywnych organach sterowych do informowania o stanie (rozdz. 6.) – modyfikacja charakterystyk wskaźnika (pkt 5.3.2, 5.6.2) – wprowadzenie elementów zmieniających percepcję ruchu 	<ul style="list-style-type: none"> – interfejsy informacyjne prezentujące poza stanem wartości ograniczeń – wskaźnik predykcyjny (pkt 5.3.2) – analiza stanu i prezentacja zagrożeń 	<ul style="list-style-type: none"> – prezentacja wyliczonej przez system trajektorii – wykorzystanie aktywnych organów sterowych do ustalenia poprawnej wartości sygnału sterującego (rozdz. 6.) 	<ul style="list-style-type: none"> – wpływ na sygnał sterujący w celu zabezpieczenia przed doprowadzeniem do stanów niebezpiecznych – ostrzeżenie o nieprawidłowej decyzji 	<ul style="list-style-type: none"> – autopilot (w kontekście sterowania na poziomie taktycznym) – FMS (w kontekście sterowania na poziomie strategicznym) – system sterowania odległościowego ze zmiennym poziomem wspomagania (pkt 5.7)
	<ul style="list-style-type: none"> – alarm z wizualizacją stanu zagrożenia – wskaźniki syntetycznej rzeczywistości – zmiana zawartości interfejsu informacyjnego zależnie od sytuacji 		<ul style="list-style-type: none"> – wskaźnik nakazowy – ograniczenie możliwości sterowania ocenianego jako niebezpieczne (pkt 4.3.5) 		–
			<ul style="list-style-type: none"> – prezentacja stanu z propozycją realizacji dalszego działania 	<ul style="list-style-type: none"> – ocena i wybór opcji z uwzględnieniem propozycji człowieka i automatyczna realizacja 	
			– wskaźnik EID (pkt 7.5)		–

Rozwiązania techniczne wspomagające proces sterowania przez człowieka kształtują proces współpracy człowieka z systemem technicznym. Do analizy

efektów wprowadzenia określonych rozwiązań przydatny jest model przetwarzania informacji (rys. 3.7).

Ogólne możliwości wspomagania w odniesieniu do etapów przetwarzania wymieniono w tab. 4.1. Same mechanizmy wspomagania mogą realizować różne zadania. W tabeli zostały podane realizacje, które wiążą się z systemami automatycznego sterowania (wyróżnione **boldem**) i takie, które mają wspomagać człowieka, lecz nie są bezpośrednią realizacją procesu sterowania.

Uwzględniając perspektywę czasową poziomów sterowania, na rys. 4.1 zilustrowano wymagania obowiązujące przy wprowadzaniu systemów zastępujących człowieka i poprawiających świadomość sytuacyjną. Zaprezentowana zależność pokazuje, że wraz ze zmniejszaniem czasu dostępnego na realizację działania (t) rośnie znaczenie działania na poziomie umiejętności (automatycznego), natomiast przy planowaniu wymagającym uwzględnienia wielu czynników i dotyczącym działań rozłożonych w długich przedziałach czasu istotniejsze jest uzyskanie wysokiej świadomości sytuacyjnej. Wydłużaniu horyzontu czasowego zadania musi towarzyszyć wykorzystanie wyższych poziomów świadomości sytuacyjnej, a dodatkowo konieczne jest przewidywanie skutków w dalszej przyszłości.



Rys. 4.1. Świadomość sytuacyjna i automatyzacja działania w zależności od rodzajów zadań (zależnie od horyzontu czasowego)

Inny aspekt kształtowania obrazuje wyróżnienie trzech podejść do analizy i syntezy systemów współpracujących z człowiekiem [227], które są określone następująco:

- 1) techniczne – skoncentrowane na zdolności realizacji określonych działań i efektywności ich realizacji,
- 2) środowiskowe – dotyczące zarówno zapewnienia działania systemu w różnych warunkach, jak i zmian w środowisku pracy będących efektem wprowadzenia różnych układów technicznych,
- 3) zespołowe – uwzględniające aspekty współdziałania, mechanizmy łączące członków zespołu i interakcje występujące pomiędzy nimi.

Wymienione w tab. 4.1 metody wspomagania w większości kształtują środowisko pracy oraz poprawiają efektywność realizacji zadań. Podejście zespo-

łowe określa nowy sposób postrzegania systemu technicznego jako członka załogi, co zostanie rozwinięte w rozdz. 7.

4.2. Efekty automatyzacji

4.2.1. Zjawiska zaobserwowane w systemach zautomatyzowanych

Sterowanie automatyczne, przy założeniu możliwości sterowania przez człowieka, oznacza możliwość zmian poziomów automatyzacji. Zwykle nie zakłada się, że samolot będzie wykonywał cały lot w trybie automatycznego sterowania i konieczne jest, aby pilot włączał się (przy klasycznym autopilocie) w proces sterowania w odpowiednich fazach lotu lub mógł przejąć sterowanie, przy w pełni automatycznej realizacji planu lotu, gdy zaistniała sytuacja wymaga odpowiedniej ingerencji. Także podczas sterowania samolotami bezzałogowymi nawet przy autonomicznej realizacji misji pozostaje możliwość włączenia się operatora SKL w proces sterowania.

Wprowadzając systemy automatycznego sterowania, zakłada się, że przez przejście części zadań bądź wykonywanie określonych czynności składowych procesu sterowania nastąpi ułatwienie realizacji procesu. Niekiedy jednak z powodu braku wiedzy o właściwościach człowieka okazuje się, że pojawiają się nowe problemy i utrudnienia.

Stwierdzone zostały następujące efekty:

- mentalne wyłączenie się człowieka przy braku czynnego zaangażowania w proces sterowania – OOTL (*Out-Of-The-Loop*) [74, 121, 131, 132, 204],
- dezorientacja co do aktualnego działania systemu i utrata świadomości sytuacyjnej, będące efektem wyłączenia mentalnego,
- niższe niż optymalne (prawo Yerksa–Dodsona [276, 165]) poziomy stymulacji i stresu w sytuacji poprawnej pracy systemu i wysokie w stanach niepoprawnych,
- niewykrycie błędów w działaniu systemu automatycznego wywołane brakiem kontroli (spowodowanej: wycofaniem uwagi, aktywnym odrzucaniem informacji sprzecznych z oczekiwaniami i przeduwagowym procesem wyłączenia percepcji informacji) [166],
- gorsza świadomość sytuacyjna w trybie pasywnym (tylko monitorowanie) niż w aktywnym [182],
- spadek umiejętności, zanik zrozumienia znaczenia części informacji jako skutek roli pasywnej w dłuższej perspektywie czasowej [147, 172, 263, 328],
- samozadowolenie indukowane przez automatykę, wynikające z akceptacji ułatwień wprowadzanych przez system sterowania i obniżenie krytycyzmu w ocenie sytuacji i działania systemu [133, 149, 252],

- nadmierne zaufanie do systemu wspomagającego,
- gwałtowny spadek poziomu zaufania po stwierdzeniu pierwszego niepoprawnego działania (*first failure effect*) [203, 252],
- nadużywanie funkcji doradczych i traktowanie wskazówek jako poleceń realizacji określonego działania [96, 203],
- problem ze zrozumieniem sposobu działania, a także rozbieżność intencji i działań człowieka oraz układów automatyki [197], jak również brak sprawności w obsłudze [184] w efekcie skomplikowania modelu efektywnego,
- po wprowadzeniu systemów FMS (*flight management system* [46]) zwiększenie liczby błędów polegających na przeoczeniu [247] oraz nieświadomione braki w wiedzy i zrozumieniu działania systemu [248],
- brak świadomości trybu pracy skutkujący niepoprawną interpretacją stanu [58],
- redukcja modelu obiektu sterowanego (np. reprezentacji zespołu napędowego z układem FADEC [327]) w efekcie uproszczenia modelu efektywnego,
- dezorientacja co do trybu pracy systemu przy zmianach poziomu automatyzacji, zwłaszcza gdy przekazanie sterowania człowiekowi jest wymuszane przez system [22, 25, 73, 121], niezrozumienie trybu pracy systemu – problem świadomości trybu [58, 197],
- uniemożliwienie działania oraz wykonywanie niestandardowych czynności celem ominięcia przeszkód generowanych przez systemy automatyczne (np. funkcje zabezpieczeń) [147],
- nieprzewidziane przez człowieka zachowanie systemu (*automation surprises*), które może wynikać z nieintuicyjnego sposobu jego działania,
- zmiana sposobu zachowania się obiektu sterowanego, która w zamierzeniu ułatwia sterowanie, lecz w pewnych stanach stwarza problemy⁵,
- doprowadzenie przez człowieka do błędnego działania systemu w wyniku nieświadomie wprowadzonych niepoprawnych danych bądź ustawienia nieprawidłowego trybu pracy,
- przeoczenie błędnego działania systemu automatycznego wynikające z wykonywania innych czynności [263],
- zmiany w technice pilotażu po wprowadzeniu systemów sterowania pośredniego [195].

Wiele z wymienionych problemów wynika z błędnego działania systemu automatycznego. Błędne działanie systemów awioniki w obecnie budowanych

⁵ W trakcie realizacji projektu oraz w czasie prób systemu SPS-01 [287] zastosowano sterowanie pośrednie zespołem napędowym z wykorzystaniem regulatora prędkości lotu. Taki sposób sterowania znakomicie sprawdzał się w locie, np. przy zwiększeniu ciągu zespołu napędowego w zakręcie oraz przy zmianach nachylenia trajektorii. Podczas lądowania w ostatniej fazie zaskoczył jednak pilota i zmusił do przerwania procedury lądowania, pilot musiał zmienić sposób działania, dostosowując się do zachowania samolotu z wprowadzonym regulatorem.

samolotach komunikacyjnych jest w znacznym stopniu zminimalizowane przez wprowadzenie redundancji oraz technik realizacji sprzętu i oprogramowania minimalizujących ryzyko wprowadzenia rozwiązań skutkujących błędnym działaniem [46, 94, 155, 289]. W lotnictwie ogólnym i bezzałogowym sytuacja jest inna. Wprowadzanie różnego rodzaju rozwiązań, obejmujących rozwiązania zarówno te sprawdzone w lotnictwie komunikacyjnym, jak i nowatorskie (zwłaszcza z zakresu samolotów ultralekkich), ze względu na ograniczenie, a najczęściej brak redundancji, oznacza większe prawdopodobieństwo zaistnienia sytuacji błędnego działania.

Zwiększenie obciążenia w trybie automatycznym, który ma zastępować człowieka, czyli w zamyśle ułatwiać sterowanie, może zaskakiwać. Jednak rozróżnienie składników obciążenia identyfikuje podstawowe źródło problemów. Wprowadzenie autopilota zastępującego pilota na poziomie umiejętności redukuje wysiłek fizyczny. Konieczność zrozumienia sposobu działania tego urządzenia komplikuje model efektywny sterowanego samolotu. Stąd należy się spodziewać zwiększenia obciążenia umysłowego podczas obsługi systemu. System FMS zastępujący człowieka w procesie sterowania na poziomie reguł (nawigacja i określanie kolejnych odcinków trajektorii) w sytuacjach typowych eliminuje człowieka z procesu sterowania. Istniejące wymaganie nadzoru nad działaniem systemu może być w tej sytuacji frustrujące, zwłaszcza dla pilota przyzwyczajonego do sterowania ręcznego.

4.2.2. Poziom zaufania

Zaufanie określa, czy użytkownik chce wykorzystywać system. Poziom zaufania powinien być adekwatny do rzeczywistych właściwości układów, a możliwe są zarówno sytuacje nadmiernego, jak i niedostatecznego zaufania. Istnieją różne definicje zaufania [11, 48]. W stosunku do układów technicznych można przyjąć, że **poziom zaufania określa to, na ile człowiek jest wewnętrznie przekonany co do poprawności i użyteczności układu technicznego, z którym współpracuje.**

Wyróżnia się trzy sposoby określania poziomu zaufania:

- emocjonalny,
- przez analogie,
- analityczny.

Czynniki emocjonalne mogące określać poziom zaufania to subiektywne odczucia. Oczywiście niektóre z tych odczuć mogą być wywołane rzeczywistymi cechami (np. frustracja na skutek błędów bądź zadowolenie wynikające z dobrej współpracy), lecz istnieje niebezpieczeństwo oddziaływania czynników marginalnych, takich jak kolorystyka, rozłożenie elementów czy nawet odczuć dotyczących czynników obocznych (np. zapach). W badaniu opisanym w pracy [181] stwierdzono istotne znaczenie odczucia sympatii (*liking*), które może być wzmacniane początkowym dobrym nastawieniem.

Wykorzystanie analogii odpowiada działaniu na poziomie reguł. W odniesieniu do zaufania oznacza to ograniczenie się do obserwacji samych działań i zwykle porównania z pewnym wzorcem mentalnym bez wnikania w sposób realizacji działań, chociaż może to być także opinia formułowana bez kontaktu z systemem, na podstawie przekazu. Takie podejście dobrze sprawdza się w normalnych działaniach, jednak istnieje zagrożenie utraty zaufania, ogólnie ujmując, w efekcie wystąpienia sytuacji nadzwyczajnych.

Proces analityczny najbardziej angażuje mentalnie. Oparcie na wiedzy i umiejętności oceniającego przy spełnieniu warunków poprawnego wnioskowania i bezbłędnych danych powinien dawać najbardziej obiektywne rezultaty. W odniesieniu do techniki lotniczej, w której czynnik bezpieczeństwa jest kluczowy i każde rozwiązanie jest dokładnie badane, dokumentowane i weryfikowane, stosowane procedury odpowiadają procesom analitycznym. Jednak zaufanie, jakie będzie miał człowiek do samolotu czy całego systemu transportu lotniczego, podlega wszystkim wspomnianym czynnikom.

Ocena zaufania uwzględnia trzy czynniki (podane w kolejności wykorzystania do oceny):

- przeznaczenie,
- sposób działania,
- spełnienie wymagań.

W zakresie zaufania do układów technicznych stwierdzono zasadniczą różnicę w porównaniu z zaufaniem pomiędzy ludźmi. Powodem są następujące różnice w założeniach:

- automatyka powinna się cechować określonym poziomem wypełniania zadań,
- człowiek może popełniać błędy.

Wymienione założenia powodują, że utrata zaufania do układów technicznych następuje szybciej po stwierdzeniu jakichś problemów niż się to dzieje w sytuacjach międzyludzkich. Na uzyskanie adekwatnego poziomu zaufania pozytywnie wpływa prezentacja oceny własnej wiarygodności [34].

4.2.3. Wpływ na świadomość sytuacyjną

Wiele z efektów nieprawidłowych interakcji wiąże się ze świadomością sytuacyjną. Na podstawie analizy efektów wspomagania zostało stwierdzone, że wspomaganie z zakresu dostarczania i przetwarzania danych poprawia świadomość sytuacyjną, natomiast automatyzacja realizacji procesu sterowania, poprawiając jakość realizacji zadania, skutkuje pogorszeniem świadomości [133, 252]. Przyczyny pogorszenia (wyłączenie mentalne, nadmierne zaufanie oraz skomplikowanie modelu efektywnego) stanowią wskazówkę, że człowiek w procesie sterowania musi pełnić rolę aktywną, a system powinien wspomagać proces sterowania przez człowieka.

Często stosowane rozwiązania techniczne dotyczą zakresu zdolności peryferyjnych (czyli właściwości receptorów i efektorów), natomiast na świadomość sytuacyjną wpływają zdolności centralne (czyli procesów percepcji, podejmowania decyzji, analizy i syntezy). Analiza zaprezentowana w pracy [47] dotycząca aparatów bezzałogowych wskazuje, że środki techniczne realizują sterowanie, wykonując rozkazy operatora SKL i dostarczają informacji, które należy traktować jako poszerzenie możliwości zmysłów. Zwiększeniu strumienia informacji nie towarzyszy jednak wsparcie procesów decyzyjnych, co powoduje znaczne obciążenie operatora i w efekcie, w istniejących systemach, obsługa jednego aparatu wymaga kilkuosobowej załogi SKL.

Oczywiste jest, że wprowadzenie dodatkowych sterowników komplikuje strukturę całości systemu. Nie jest to jednak istotne dla człowieka operatora. Operator tworzy swój model procesu sterowanego na podstawie obserwacji i analizy efektów działania realizowanego za pośrednictwem interfejsów sterujących, obserwowanych przez interfejsy informacyjne. Dlatego postuluje się, aby interfejsy przekazywały stan w sposób zrozumiały, odzwierciedlając strukturę informacji, natomiast odzwierciedlenie złożoności strukturalnej w interfejsach informacyjnych było redukowane [127].

Dostrzeżenie znaczenia świadomości sytuacyjnej znalazło odzwierciedlenie w koncepcji automatyki wspomagającej procesy umysłowe CA (*Cognitive Automation*) [129, 229, 250, 254]. Wspomaganie to zgodnie z modelem SRB dotyczy analizy i podejmowania decyzji na poziomach wiedzy i reguł w procesach:

- interpretacji stanu,
- diagnozy sytuacji,
- określenia celu działania, które sprowadza się do aktywacji celu adekwatnego do sytuacji,
- podejmowania decyzji, planowania i kolejkowania zadań.

Wysuwana jest teza, że **zwiększenie efektywności coraz bardziej złożonych systemów zautomatyzowanych współpracujących z człowiekiem nie jest możliwe bez wprowadzenia CA**. Jako główną przyczynę podaje się problemy ze świadomością sytuacyjną, których występowanie w klasycznych systemach zautomatyzowanych uniemożliwia efektywne wykorzystanie rozwiązań mających poprawiać efektywność i zmniejszać obciążenie. Poprawę świadomości sytuacyjnej należy odpowiednio rozumieć, gdyż nadmiar informacji może skutkować przeciążeniem i pogorszeniem jakości realizacji zadania [294].

Porównanie dwóch systemów wspomagania pilotów samolotów bojowych: *Copilote Electronique* zaprojektowanego z uwzględnieniem wspomaganie świadomości i *Pilot's Associate*, który został zaprojektowany w koncepcji wspomaganie realizacji zadań, prowadzi do konkluzji, że dla pilota bardziej użyteczne jest wspomaganie świadomości sytuacyjnej niż wspomaganie etapu planowania oraz że przy wspomaganie podejmowania decyzji system powinien raczej poddawać je krytyce niż proponować własne rozwiązania [272]. Innym przykładem zastosowania CA jest prototypowy system wspomagający pilota [250]. Rozwią-

zanie to efektywnie redukuje wysiłek, poprawia świadomość sytuacyjną i jakość realizacji zadania. Podstawowe założenia, które przyjęto w odniesieniu do współpracy człowieka z tym systemem (wzajemne monitorowanie, zapewnienie pełnej informacji i przewidywalnego działania) oznaczają, że system stał się partnerem w załodze.

Z wpływu systemów wspomagających pilota na świadomość sytuacyjną wynika następujący wniosek:

System będący partnerem w załodze musi działać w sposób zrozumiały i akceptowalny przez człowieka, a jego działania nie mogą zaskakiwać człowieka niewytłumaczalnymi bądź tak skomplikowanymi zamiarami, że do ich zrozumienia konieczne jest wykorzystanie złożonego modelu mentalnego.

4.3. Ostrzeganie i zabezpieczenie przed niepoprawnym działaniem

4.3.1. Ograniczenia

Klasyfikacja poprawności i bezpieczeństwa stanu, w którym znajduje się samolot, jest niezbędna do prawidłowej realizacji celu zadania lotniczego. Ograniczenia człowieka, skutkujące błędami polegającymi na przeoczeniu zagrożenia, kompensują systemy wspomagające, jakimi są systemy ostrzeżeń o sytuacji zewnętrznej (np. GPWS – *Ground Proximity Warning System*, TAWS – *Terrain Avoidance Warning System*, TCAS – *Traffic Alert and Collision Avoidance System*), systemy informujące o niebezpiecznym stanie (np. sygnalizator niebezpieczeństwa przeciągnięcia). We współczesnych samolotach komunikacyjnych system sterowania zawiera zintegrowane funkcje oceny stanu oraz oceny działań pilota, które poza przekazem informacji oddziałują na proces sterowania.

Przyczyną zaistnienia stanu niebezpiecznego mogą być: czynnik zewnętrzny (zakłócenie, intruz w przestrzeni powietrznej), błędne działanie pilota, a także czynnik wewnętrzny (awaria, błąd w systemie). Przyczyny błędnego działania mogą się pojawić na różnych etapach procesu przetwarzania informacji oraz mogą wynikać z niepoprawnej procedury, przyjęcia błędnej strategii oraz źle zdefiniowanego celu działania [165]. Zmiany sytuacji wymagają adaptacji systemu zabezpieczeń, zwłaszcza przy założeniu małego doświadczenia człowieka [298].

Sytuacje niebezpieczne można powiązać z wartościami zmiennych stanu. Jeśli istnieją wartości zmiennych, których przekroczenie skutkuje zagrożeniem, to takie wartości można podać jako graniczne. Parametry bezpośrednio określające bezpieczną eksploatację wynikają z właściwości konstrukcji i charakterystyk samolotu – określają zakresy dopuszczalnych wartości zmiennych (sygnałów w układzie sterującym oraz innych wielkości, np. naprężeń w konstrukcji).

Z tych parametrów podstawowych, aczkolwiek nie zawsze mierzonych, wynika ją ograniczenia dla innych wielkości, które pilot może kontrolować.

Przy określaniu wartości granicznych wykorzystuje się pewne, z reguły uproszczone, zależności i dąży do uzyskania prostego modelu dla oceny stanu przez człowieka. Niestety, prowadzi to do konieczności zapewnienia zapasu bezpieczeństwa dla ocenianej wielkości, co zwykle skutkuje nadmiernie ostrożną oceną. Dla pełnego wykorzystania właściwości samolotu korzystne jest, aby jak najdokładniej określić związki pomiędzy wielkościami. Konieczne jest także wprowadzenie układów technicznych wspomagających, a nawet zastępujących pilota podczas realizacji zadania oceny stanu.

W systemach wspomagających pilota dokładniejszy model ograniczeń, który można opisać za pomocą pewnej funkcji ζ :

$$\{x: \zeta(x) \leq 0\} \quad (4.1)$$

jest określany jako zabezpieczenie przed przekroczeniem (*envelope protection*).

Kolejny zbiór ograniczeń wynika ze stanu otoczenia samolotu – będą to więc ograniczenia zmieniające się w czasie. Przykładami są tutaj ukształtowanie terenu oraz położenie obiektów latających i naziemnych.

Pełna ocena poprawności działania sterującego wiąże się z określeniem ograniczeń wartości stanów obiektu sterowanego, które mogą wynikać z różnych przesłanek:

- ograniczenia możliwych do osiągnięcia wartości, co dotyczy raczej sygnałów sterujących, występowanie dla stanu wiąże się z nieciągłą zmianą modelu,
- ograniczenia wartości zmiennych ze względu na efekty, których należy unikać, np. przeciążenia, które człowiek źle znosi,
- ograniczenia wartości zmiennych ze względu na efekty, które mogą prowadzić do uszkodzeń, np. przeciążenie konstrukcji,
- ograniczenia ze względu na potencjalne lub rzeczywiste niebezpieczeństwo, np. ograniczenie przestrzeni dopuszczalnych przelotów ze względu na panujący ruch oraz ze względu na występujące przeszkody terenowe, czyli ogólnie niebezpieczeństwo kolizji,
- niedopuszczenia do stanów, w których sterowanie obiektem staje się niemożliwe. Należy tutaj wyróżnić:
 - całkowitą utratę możliwości sterowania,
 - chwilową utratę możliwości sterowania – gdy wyprowadzenie z sytuacji niebezpiecznej wymaga specyficznego sposobu sterowania (często pewnej sekwencji i to z wykorzystaniem wartości sygnałów sterujących bliskich granicznym), a podczas sterowania wykorzystywane są pewne znane, aczkolwiek trudne do opisu modelem matematycznym,

zachowania obiektu sterowanego, np. podczas wyprowadzania samolotu z przeciągnięcia,

- zmniejszenia prawdopodobieństwa doprowadzenia do stanów trudnych, tj. dla człowieka takich, gdy istnieje duże prawdopodobieństwo utraty świadomości sytuacyjnej, a dla sterownika wprowadzenie w zakres stanów, dla jakich nie był projektowany,
- ograniczeń prawnych np. emisja hałasu.

Podane przykłady ograniczeń obrazują różnorodność i różnice w ich ważności. Wykorzystanie informacji o wartościach ograniczeń i przeprowadzenie oceny stanu obiektu sterowanego wymaga wprowadzenia wag dla poszczególnych zbiorów ograniczeń.

4.3.2. Stan procesu dynamicznego

Ogólniejsze spojrzenie na ograniczenia stanu wynika z zastosowania analizy w przestrzeni stanów. W przestrzeni tej po uwzględnieniu kryterium bezpieczeństwa realizacji lotu (a także innych kryteriów) podczas typowej eksploatacji tworzy się obszar stanów dozwolonych (w skrócie **obszar dozwolony**). Stany samolotu, które zagrażają bezpieczeństwu (samego samolotu lub jego otoczeniu) tworzą obszar stanów zabronionych (w skrócie **obszar zabroniony**). W tym obszarze wydzielony zostanie **obszar katastrofalny**, czyli obejmujący stany, które niezależnie od sterowania (w zakresie sterowania dostępnego, a więc ograniczonego przez zakresy sygnałów sterujących) prowadzą do katastrofy bądź w najlepszym razie – zdarzenia lotniczego. W zakresie przestrzeni lotniczej granice obszarów wynikają z ruchu lotniczego, ukształtowania powierzchni Ziemi oraz z istnienia przeszkód terenowych.

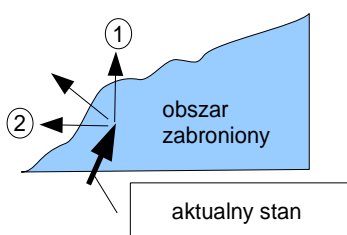
Jeśli jest znany cel sterowania, to w obszarze dozwolonym można wydzielić **obszar preferowany**, czyli taki, w którym samolot powinien się znaleźć zgodnie z założonym planem lotu bądź ogólnie znaleźć się w tym stanie zapewni realizację celu sterowania.

Ocena stanu musi uwzględniać nie tylko aktualny, ale także przyszły stan obiektu sterowanego. Przyszłe stany są wynikiem ewolucji w czasie stanu procesów dynamicznych pod wpływem sygnałów zewnętrznych, zależą zatem od charakterystyk tych procesów dynamicznych, sposobu sterowania oraz występujących zakłóceń. W zakresie przewidywania przyszłych stanów występują dwa różniące się zagadnienia.

Pierwsze zagadnienie dotyczy stanu, jaki powinien osiągnąć samolot ze względu na swoje właściwości. Odpowiednio wczesna informacja o zbliżaniu się do obszaru niebezpiecznego zwiększa zapas czasu na reakcję pilota. Czas jest jednym z istotniejszych czynników wpływających na efektywność reakcji w danej sytuacji [320]. W niektórych przypadkach brak uprzedzenia uniemożliwia podjęcie skutecznej akcji unikania niebezpieczeństwa.

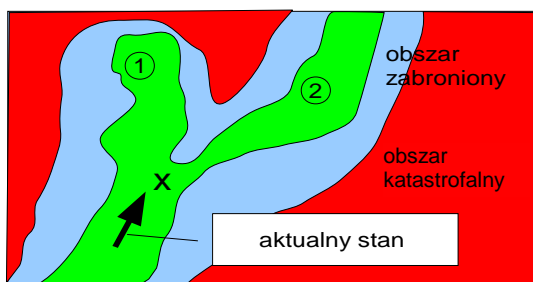
Drugie zagadnienie dotyczy przewidywania przyszłego stanu celem detekcji zmian w charakterystykach samolotu. Takie niespodziewane zmiany powodują modyfikację modelu dynamiki. Jeżeli człowiek jest nieprzygotowany, mogą skutkować reakcją, która w przypadku nominalnego modelu byłaby poprawna, lecz w nowej sytuacji staje się nieskuteczna. Zmiana warunków zewnętrznych jest także czynnikiem modyfikującym efekt sterowania.

Stan w przestrzeni \mathbb{R}^n , w odróżnieniu od zagadnień jednowymiarowych, pozwala uniknąć bądź opuścić obszar zabroniony na wiele sposobów. Na rysunku 4.2 zobrazowano istnienie dwóch podstawowych sterowań (oraz wielu będących połączeniem tych dwóch), prowadzących do wyjścia z obszaru zabronionego. Wybór sposobu reakcji, jeśli nie występują dodatkowe ograniczenia, jest więc w tej sytuacji arbitralny. Możliwe jest wpływanie na decyzję przez formę prezentacji stanu. Stwierdzono, że w zależności od rodzaju wskaźnika piloti preferują określony typ manewru uniku [4].



Rys. 4.2. Możliwości uniknięcia zagrożenia; 1 i 2 – dwie reakcje podstawowe

Wpływ horyzontu czasowego ilustruje rys. 4.3, na którym wyróżniono dwa stany w obszarze dozwolonym, określanym w krótkiej perspektywie dla obiektu będącego w ciągłym ruchu (założono, że prędkość obiektu oraz promień zakrętu wynikający z charakterystyk obiektu są większe od pewnego minimum). Jeśli ze względu na właściwości dynamiczne ruch z punktu 1 prowadzi zawsze do obszaru zabronionego, to obszar prowadzący do stanu 1 powinien być zakwalifikowany jako zabroniony. Jest to możliwe jedynie przy analizie stanu dla osiągalnych położzeń w wyniku ruchu w dłuższym czasie. Należy jeszcze zwrócić uwagę, że wybór dokonywany w punkcie x na podstawie najbliższego otoczenia może błędnie wyeliminować trajektorię prowadzącą do punktu 2.



Rys. 4.3. Graficzne przedstawienie „sytuacji bez wyjścia”, która pojawia się po wybraniu ruchu w kierunku 1

Przedstawiona analiza poziomów planowania pokazuje złożoność procesu oceny i podejmowania decyzji, która musi być uwzględniona podczas wspomaganie pilota. Przyjęcie jednoznacznego celu sterowania powoduje redukcję całego procesu analizy do poziomu bieżącego, a zatem znacznie redukuje poziom niepewności, co jest dla projektantów urządzeń technicznych dużą zaletą. Niestety, równocześnie następuje redukcja możliwości zmian w sposobie działania.

W wielu zadaniach, aby informacje o stanie samolotu zostały wykorzystane efektywnie, konieczne jest dokonanie oceny w kontekście aktualnie realizowanego sposobu sterowania. Przykładowo, ten sam sposób sterowania, polegający na realizacji lotu w kierunku powierzchni Ziemi może być podejściem do lądowania lub też niebezpiecznym, błędnym manewrem określanym jako *controlled flight into terrain* (CFIT), będącym jednym z częstych przyczyn wypadków. Także sama ocena niebezpieczeństwa stwarzanego przez określony sposób sterowania samolotem zależy od aktualnego stanu samolotu. Manewry, które są niebezpieczne na małych wysokościach, na większych wysokościach często stwarzają niewielkie zagrożenie bądź są nawet całkowicie bezpieczne.

4.3.3. Reprezentacja ograniczeń w przestrzeni stanów

Niech obiekt składający się z wielu procesów dynamicznych będzie opisany ogólnym równaniem (3.10). Ograniczenia wartości zmiennych stanu, sygnałów sterujących z uwzględnieniem zakłóceń można opisać przez funkcję:

$$c = \zeta(x, u, z, \pi) \quad (4.2)$$

pewną macierz transformacji $L \in \mathbb{R}^{n_v \times n_c}$ oraz wektor ograniczeń parametrycznych v_c , zdefiniowany jako zbiór:

$$C = \{c \in \mathbb{R}^{n_c} : L \cdot c \leq v_c\} \quad (4.3)$$

Wykorzystując pojęcie zbioru rozmytego, należy określić funkcję przynależności do zbioru C :

$$\mu_C(L \cdot c) : \mathbb{R}^{n_v} \rightarrow \langle 0, 1 \rangle \quad (4.4)$$

Najprostszym rozwiązaniem jest analiza poszczególnych zmiennych. W publikacji [143] została przedstawiona taka uproszczona wersja systemu oceny współpracującego z elementem ograniczającym sygnały sterujące. Takie podejście powoduje niestety, że wynikowy system oceny cechuje znaczna ostrożność, w efekcie czego możliwe są alarmy w sytuacjach, które faktycznie nie powodują zagrożenia.

Zagadnienie klasyfikacji stanu względem ograniczeń dla ogólnej postaci nie jest łatwe już na etapie określenia funkcji ζ i macierzy L . Często wiedza o wzajemnych zależnościach pomiędzy różnymi zmiennymi jest niekompletna i wtedy bardziej użyteczne okazuje się zastosowanie zależności przybliżonych:

$$c_i = \zeta_i(x, u, z, \pi) \quad (4.5)$$

gdzie $c_i \in \mathbb{R}^{n_i}$: $n_i < n_c$. Wówczas po uwzględnieniu braku części zmiennych wektora c zbiory C_i określone wzorem (4.3) mają prostszą postać. Funkcje ζ_i powinny zostać tak dobrane, aby spełniony był warunek:

$$\sum C_i \subset C \quad (4.6)$$

Mówi się wówczas o aproksymacji ostrożnej zbioru ograniczeń – nieprzekraczanie granic zbioru $\sum C_i$ zapewnia, że nie nastąpią przekroczenia granic zbioru C .

Zależności przybliżone umożliwiają realizację systemu oceny ograniczeń w strukturze rozproszonej. Niech do każdego zbioru C_i będzie przyporządkowany agent A_i , którego zadaniem jest ocena, czy $\zeta_i(x, u, z, \pi) \in C_i$.

W systemie rozmytym agent określa poziom przynależności stanu do zbioru \bar{C}_i , oznaczony jako $\bar{\mu}_i = 1 - \mu_i$. Wyniki ocen cząstkowych są agregowane przez operację:

$$\mu_w = s(1 - \mu_1, 1 - \mu_2, \dots) \quad (4.7)$$

Uzyskany wynik jest następnie interpretowany w kontekście bezpieczeństwa, przy czym wyróżnia się trzy kategorie:

- stan normalny $\mu_w < \mu_{norm}$,
- ostrzeżenie $\mu_w \in \langle \mu_{norm}, \mu_{warn} \rangle$,
- stan niebezpieczny $\mu_w > \mu_{warn}$.

Dla ograniczeń zdefiniowanych w postaci zależności (4.3) sprawdzenie poprawności stanu sprowadza się do określenia przynależności aktualnych wartości zmiennych stanu do zbioru stanów dopuszczalnych. Nie zawsze jednak same wartości niosą informację o tym, czy stan jest poprawny. Przykładowo, podczas analizy pracy układu stabilizacji pewnej wielkości (mogą to być kąty pochylenia i przechylenia, kurs) jednym z rodzajów niepoprawnej pracy systemu sterowania jest generowanie oscylacji o ustalonej amplitudzie. Takie zachowanie pojawia się jako cykl graniczny w efekcie istnienia w układzie silnych nielinowości (np. stref martwych), gdy sterownik nie zostanie uodporniony na ten efekt. Podany przykład wskazuje na konieczność określenia nowych zmiennych odzwierciedlających określone cechy sygnałów.

Niech Y' będzie przestrzenią funkcji $y': \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^m$, natomiast T – operatorem zdefiniowanym na przestrzeni V funkcji obejmującej stan, sterowanie i zakłócenia: $V = \{X, U, Z\}$. Operator może być definiowany dla funkcji ciągłych $T: V \rightarrow Y'$ lub bardziej praktycznie dla przebiegów próbkowanych $T: V' \rightarrow Y'$.

Wartości funkcji $y'(k) = [y'_1(k), y'_2(k), \dots, y'_m(k)]^T$ określają oceniane właściwości funkcji $x(t)$.

Nowa definicja ograniczeń jest określona przez pewną funkcję:

$$c_i = \zeta_{T,i}(y', \pi) \quad (4.8)$$

Pozostałe zależności pozostają niezmienione.

Dekompozycja systemu oceny stanu na strukturę rozproszoną ma następujące zalety:

- pokazuje informacje cząstkowe o wartościach, umożliwiając lokalizację parametrów, których wartości są najbliższe granicy lub powodują jej przekroczenie,
- system rozproszony umożliwia łatwą zmianę konfiguracji,
- opis ograniczeń jest zgodny z opisem ekspertów.

4.3.4. Ewaluacja ograniczeń dla procesu dynamicznego

Określenie ograniczeń dla procesu dynamicznego musi brać pod uwagę właściwości samego procesu, ocena stanu aktualnego jest więc niekompletna, jeśli nie zostanie uwzględnione to, jak może przebiegać zmiana stanu w przyszłości.

Prostym rozwiązaniem niewymagającym znajomości modelu procesu sterowanego jest wykorzystanie predykcji stanu zgodnie z zależnością:

$$\hat{y}(t + \tau) = y(t) + \tau \cdot \dot{y}(t) \quad (4.9)$$

Przyjmując horyzont czasowy predykcji odpowiedni do właściwości dynamicznych procesu sterowanego oraz wykorzystując monotoniczność zależności (4.9), można oceniać równocześnie wartość aktualną i przewidywaną. Dla pewnych zmiennych (np. kąt przechylenia) wartość przewidywana jest bardziej adekwatna do poziomu zagrożenia przekroczeniem ograniczenia niż stan aktualny.

Analityczne określenie zbioru stanów bezpiecznych z wykorzystaniem modelu procesu dynamicznego jest zadaniem złożonym. Przy obiekcie opisanym równaniami różniczkowymi zwyczajnymi, aby określić zbiór stanów osiągalnych, rozwiązuje się równanie różniczkowe Hamiltona–Jakobiego [185]. Zbiór stanów osiągalnych dla założonego zakresu sterowania lub przyjętego jednego sposobu sterowania jest podstawą do konstrukcji zbioru stanów bezpiecznych.

Tego rodzaju rozwiązanie zostało zastosowane w systemie półautomatycznego (poziom automatyzacji – wspólne sterowanie) lądowania, do oceny możliwości kontynuacji bezpiecznego lądowania [200].

Proponowany sposób określenia granic stanów bezpiecznych polega na wykorzystaniu operatora ewolucji stanu, który może wynikać z modelu analitycznego lub może zostać określony doświadczalnie.

Niech będzie dany proces dynamiczny opisany równaniem (3.2), gdzie na wyjściu są obserwowane wybrane zmienne stanu:

$$y = h(x) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x \quad (4.10)$$

Dla uproszczenia zapisu przyjęto, że są to pierwsze elementy wektora x . Do dalszych rozważań zostanie przyjęte, że zmienne wyjściowe są reprezentatywne dla stanu procesu dynamicznego przy rozpatrywanym zagadnieniu.

Definicja 4.1

Zmienne wyjściowe y są reprezentatywne, jeśli dla niepustych zbiorów C (zbiór stanów dopuszczalnych) i C' , takich że $C \cup C' = \chi$, $C \cap C' = \emptyset$, gdzie χ jest zbiorem wszystkich osiągalnych stanów, istnieją niepuste zbiory C_y i C'_y , takie że $C_y \cup C'_y = v$, $C_y \cap C'_y = \emptyset$ i $\forall x \in C', h(x) \in C'_y$, gdzie v jest zbiorem wszystkich osiągalnych wartości $y = h(x)$.

Podana definicja określa słaby warunek reprezentatywności, który może prowadzić do odrzucenia części stanów dopuszczalnych. Silna reprezentatywność wymaga spełnienia dodatkowo warunku:

$$\forall x \in C, h(x) \in C_y \quad (4.11)$$

Zagadnienie ewolucji ograniczeń wynika z konieczności rozwiązania problemu zaprezentowanego na rys. 4.3. Podstawą do rozwiązania tego zagadnienia jest stwierdzenie:

Jeśli od stanu początkowego x_0 dla każdego możliwego sterowania stan procesu dynamicznego dąży do stanu w C' , to stan x_0 także powinien się znaleźć w zbiorze C' .

Analizując zaprezentowane metody określania w przestrzeni stanów granic obszarów zabronionych, zauważa się dwa podstawowe problemy: złożoność obliczeniową oraz konieczność dokładnego modelowania analizowanego procesu dynamicznego. Wszelkie niepewności i zmienności modelu prowadzą zatem do rozwiązań, które nie odzwierciedlają rzeczywistych ograniczeń.

Niech zbiór U funkcji $u: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$ określa osiągalne przebiegi wartości sterujących w czasie. Dla każdej funkcji u definiuje się podzbiór $U(u, t)$:

$$u' \in U(u, t) \Leftrightarrow u' \in U \text{ oraz } \forall 0 \leq \tau \leq t, u'(\tau) = u(\tau) \quad (4.12)$$

Niech operator:

$$y(t) = \varphi(x_0, u)(t) \quad (4.13)$$

opisuje ewolucję w czasie stanu procesu dynamicznego od stanu początkowego x_0 przy sterowaniu u . W dalszej analizie będą wykorzystywane zmienne wyjściowe y , przy założeniu reprezentatywności dla analizowanego zagadnienia.

Proponowane podejście nie wymaga określenia modelu w postaci równań różniczkowych, lecz wykorzystuje przybliżenie operatora ewolucji stanu przez funkcję:

$$y(t + \tau | t) = \hat{\varphi}(x(t), u)(\tau) \quad (4.14)$$

Niech teraz w zmiennych stanu zostaną wyróżnione trzy składniki:

- zmienne stanu, dla których ograniczenia są zadane i się nie zmieniają – x_p ,
- zmienne stanu, dla których ograniczenia są zadane – x_z ,
- zmienne, których ograniczenia są poszukiwane – x_s .

Ograniczenia są zadawane przez opisanie zbiorów C_p i C_z , poszukiwany jest natomiast zbiór C , przy założeniu że sygnał sterujący należy do zbioru $U(u, T)$.

Niech funkcje $\mu_p, \mu_z, \mu(x, u; T)$ określają przynależność stanu do zbioru przy spełnieniu warunków ograniczeń. Funkcja $\mu(x, u; T)$ jest dodatkowo parametryzowana przez założony czas T , który określa czas do zmiany sposobu sterowania.

Niech funkcja (χ jest zbiorem wszystkich osiągalnych stanów)

$$L(x): \chi \rightarrow \{0, 1\} \quad (4.15)$$

dla logiki dwuwartościowej lub

$$L(x): \chi \rightarrow \langle 0, 1 \rangle \quad (4.16)$$

dla logiki rozmytej określa przynależność stanu do zbioru C' . Funkcja L spełnia warunek:

$$\forall x \in \chi, L(x) \leq \max(1 - \mu_p(x), 1 - \mu_z(x)) \quad (4.17)$$

Odwzorowanie L będzie budowane metodą iteracyjną. Wartości początkowe są określone zgodnie z zależnością:

$$\forall y \in v, L_0(y) = \max(1 - \mu_p(y), 1 - \mu_z(y)) \quad (4.18)$$

w której wykorzystano warunek reprezentatywności zmiennych wyjściowych do zmiany (redukcji) wymiaru rozważanej przestrzeni stanów.

W kolejnych krokach odwzorowanie jest modyfikowane zgodnie z algorytmem opisanym zależnością:

$$L_{k+1}(y, \mathbf{u}) = \max\left(\min_{\mathbf{u}' \in U(\mathbf{u}, T)} L_k(\hat{\phi}(y, \mathbf{u})(t), \mathbf{u}'), L_k(y, \mathbf{u})\right) \quad (4.19)$$

natomiast stany y i sterowania \mathbf{u} są generowane z wykorzystaniem metody Monte Carlo (opis metody np. [164]).

Twierdzenie 4.1

$$\forall y \in v, \lim_{k \rightarrow \infty} L_k(y, \mathbf{u}) = 1 - \mu(y, \mathbf{u}; T) \quad (4.20)$$

Dowód

Z warunku początkowego (4.18) wynika, że jeśli $L_0(y, \cdot) = 1$, to y jest stanem zagrożenia. Zbiór stanów, dla których $L < 1$, zawiera stany spełniające warunek:

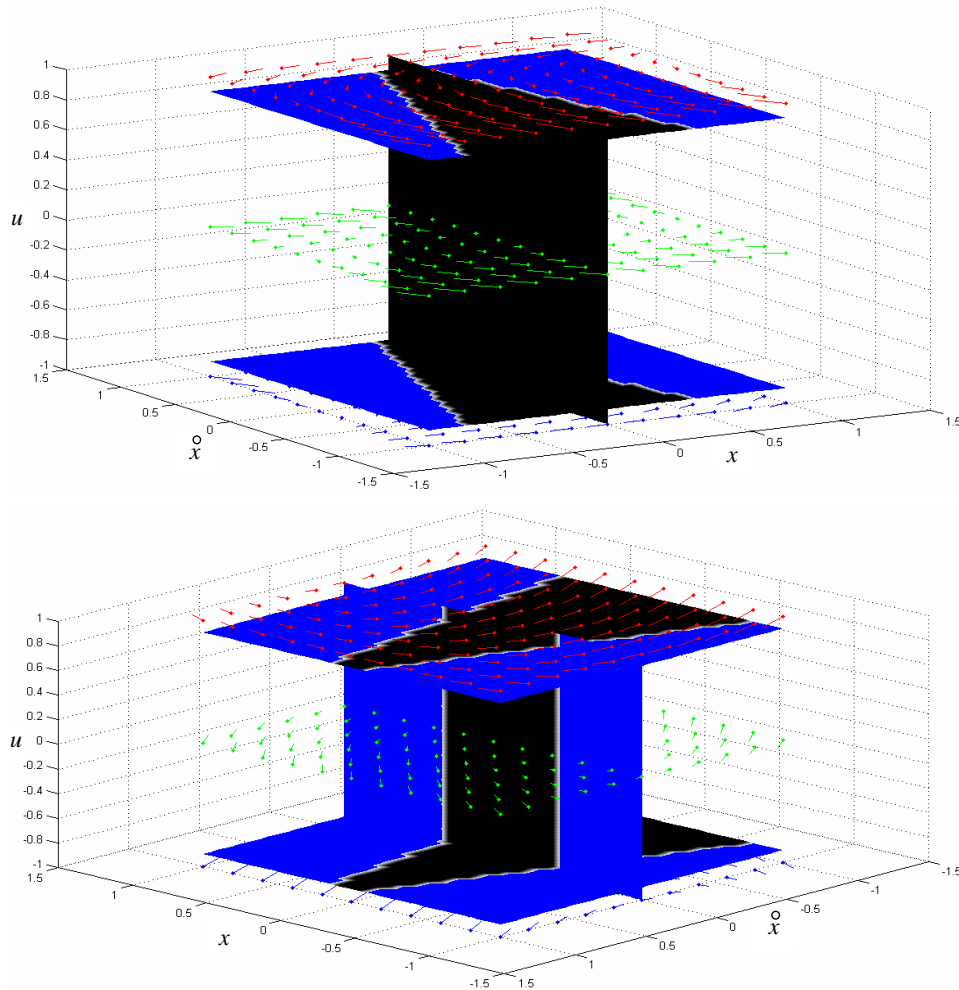
$$L_0(y, \mathbf{u}) \leq 1 - \mu(y, \mathbf{u}; T) \quad (4.21)$$

Z założeń metody wynika, że dowolny stan y prowadzący przy pewnym sterowaniu \mathbf{u} do stanu y' , dla którego $\mu' < 1$, powoduje, że wartość $L_{k+1}(y, \mathbf{u}) \geq 1 - \mu'$. Dla dużej liczby powtórzeń iteracji każdy ze stanów jest uwzględniany wielokrotnie, zatem dla każdego stanu y' istnieje takie k , że zachodzi dla tego stanu zależność (4.20).

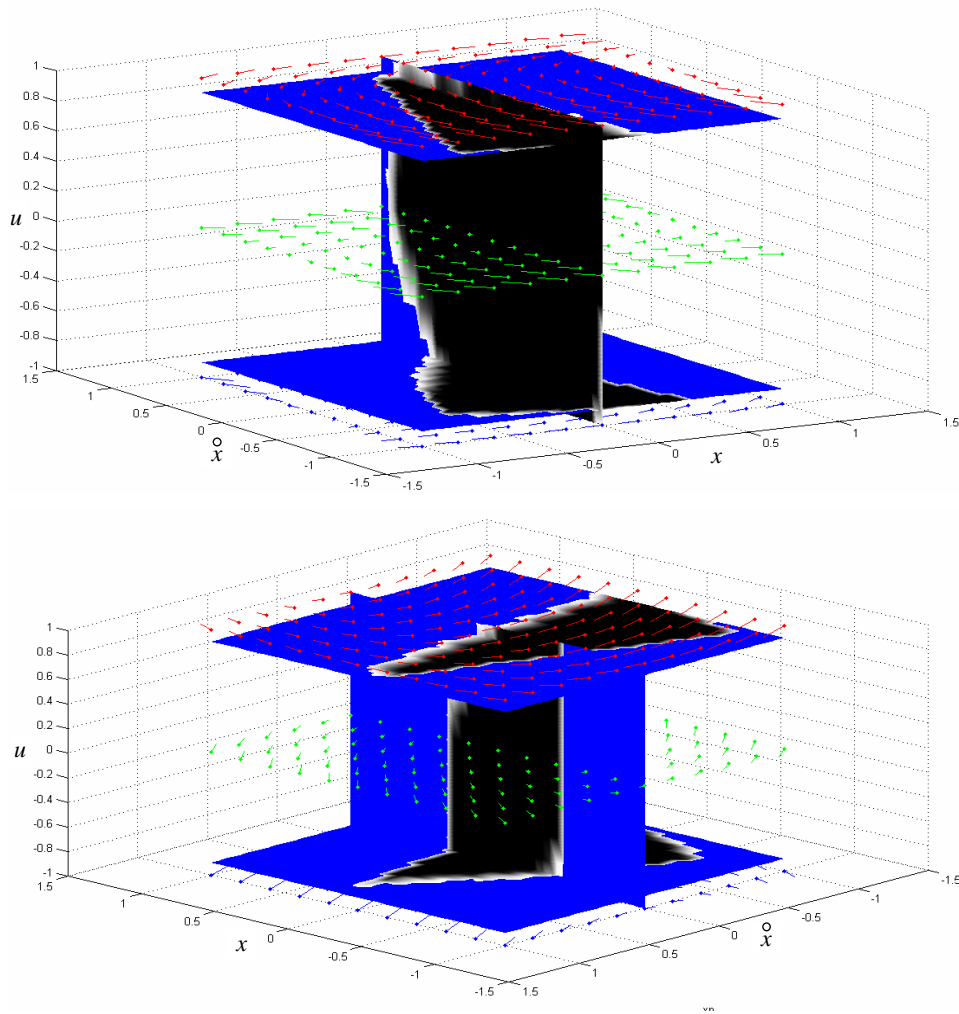
Celem ilustracji wykonano obliczenia dla procesu dynamicznego opisanego równaniem różniczkowym drugiego rzędu z jednym sygnałem sterującym. Przyjęte ograniczenia określono dla zbiorów $x_p = \emptyset$ i $x_s = x_z = \{x; \dot{x}\}$. Dla przyjętych arbitralnie ograniczeń (zaprezentowanych na rys. 4.4 w przestrzeni określonej przez zmienne $[x, \dot{x}, u]$), przyjmując $T = 0,3$, wykonano eksperyment symulacyjny z zastosowaniem metody Monte Carlo określania stanów początkowych. Wynikiem obliczeń jest wyznaczenie zakresu stanów dopuszczalnych ze względu na przyjęte ograniczenia. Na rysunku 4.5 są widoczne obrazy przekrojów

uzyskanego zbioru stanów. Kolor czarny oznacza stany dopuszczalne, niebieski – niedopuszczalne. Odcienie szarości obrazują niepełną przynależność do zbiorów.

Komentarza wymaga zastosowana metoda reprezentacji zbioru. Wykorzystana forma tabelaryczna umożliwia bezpośrednie przeniesienie wyników do oprogramowania systemu ostrzeżeń, lecz wiąże się z niedokładnościami wynikającymi z dyskretyzacji argumentów, co jest widoczne jako obszary szare. Dodatkowo, celem przedstawienia charakterystyk procesu dynamicznego zostały umieszczone wektory oznaczające kierunek i szybkość zmiany stanu dla trzech wartości sygnału sterującego.



Rys. 4.4. Ograniczenia zadane w formie przekrojów; obszar czarny – stany dopuszczalne na etapie zadawania ograniczeń, niebieski – stany zabronione. W trzech przekrojach przestrzeni, czyli dla trzech wartości sygnału sterującego, zostały zaprezentowane wektory ewolucji stanu



Rys. 4.5. Obszary stanów poprawnych określone dla założonego procesu dynamicznego na podstawie ograniczeń określonych jak na rys. 4.4

Algorytm (wzór (4.19)) wymaga przeszukiwania zbioru sterowań, co skutkuje dużym nakładem obliczeń. Jeśli proces dynamiczny dla rozważanego zbioru stanów X_r ma następującą właściwość:

$$\forall x \in X_r, y(t+\tau) = y(t) + \Delta\varphi(x, u)(\tau) \quad (4.22)$$

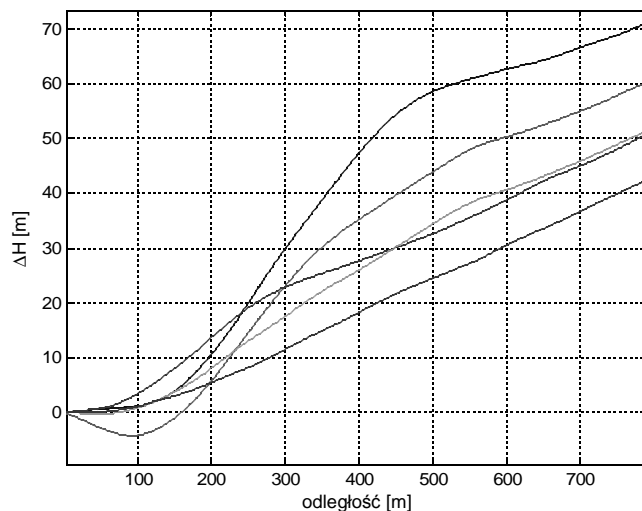
to można określić sposób sterowania $u' \in U$ prowadzący do uzyskania maksymalnego efektu zmiany stanu w pożądanym kierunku, niezależnie od stanu

początkowego. Wtedy dla jednoznacznie określonej funkcji $\varphi(y, \mathbf{u})(t) = \varphi(y, \mathbf{u}'(y))(t)$ granice obszaru dopuszczalnego wynikają z warunku:

$$y \in C \Leftrightarrow \forall t \geq 0, y + \Delta\varphi(x_0, \mathbf{u}'(y))(t) \in C_z \quad (4.23)$$

Przykładem jest zagadnienie lotu nad terenem, gdy obszar stanów dopuszczalnych jest ograniczony elewacją gruntu i wysokością innych ewentualnych przeszkód, a w sytuacji zbliżania się do ograniczeń poszukiwane sterowanie ma doprowadzić samolot do stanu wznoszenia z największą prędkością pionową. Implikuje to rozwiązanie, które można opisać werbalnie jako maksymalny ciąg zespołu napędowego i takie sterowanie pochyleniem, aby uzyskać prędkość lotu odpowiadającą maksymalnemu wznoszeniu (wprowadzenie kolejnych elementów sterowych, np. klap, pozwala na jeszcze inne sposoby sterowania, co jednak nie będzie tutaj rozważane).

W odróżnieniu od automatu człowiek nie zapewnia powtarzalności realizacji procesu sterowania. Na rysunku 4.6 widoczne są profile zmiany wysokości zarejestrowane dla jednego pilota, wynikające z różnic w koordynacji ruchów steru wysokości i dźwigni mocy zespołu napędowego przy identycznych warunkach początkowych.

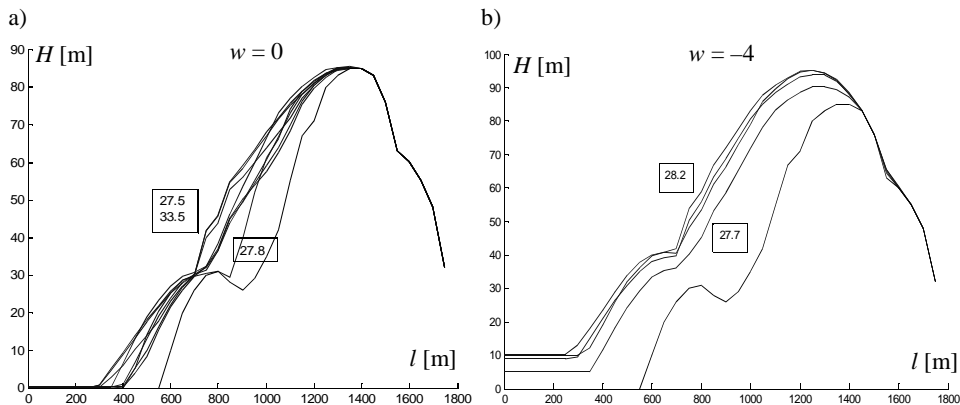


Rys. 4.6. Procesy przejściowe w początkowej fazie zmiany wysokości lotu

Operator ewolucji stanu został określony metodą doświadczalną. Przeprowadzono eksperyment polegający na wykonaniu przez pilota serii manewrów przejścia samolotu do wznoszenia przy różnych warunkach początkowych. Eks-

peryment został zrealizowany na stanowisku symulacyjnym, ale identyczny eksperyment można zrealizować także w locie rzeczywistym.

Następnie wykonano obliczenia dla przyjętego profilu terenu, który w zależności (4.23) określa zbiór C_z . Zarejestrowane profile zmiany wysokości zostały wykorzystane do określenia operatora $\Delta\varphi(x, u)(\tau)$. Granice zbiorów C zależą od sposobu sterowania oraz stanu początkowego. Dla przebiegów zaprezentowanych na rys. 4.7a stan początkowy to lot poziomy, na rys. 4.7b zaś stan początkowy to opadanie z prędkością $w = -4$ m/s. Widoczna konieczność zwiększenia zapasu wysokości przy opadaniu jest efektem oczywistym. W obydwu sytuacjach widoczny jest natomiast wpływ sposobu realizacji manewru na granicę obszaru.

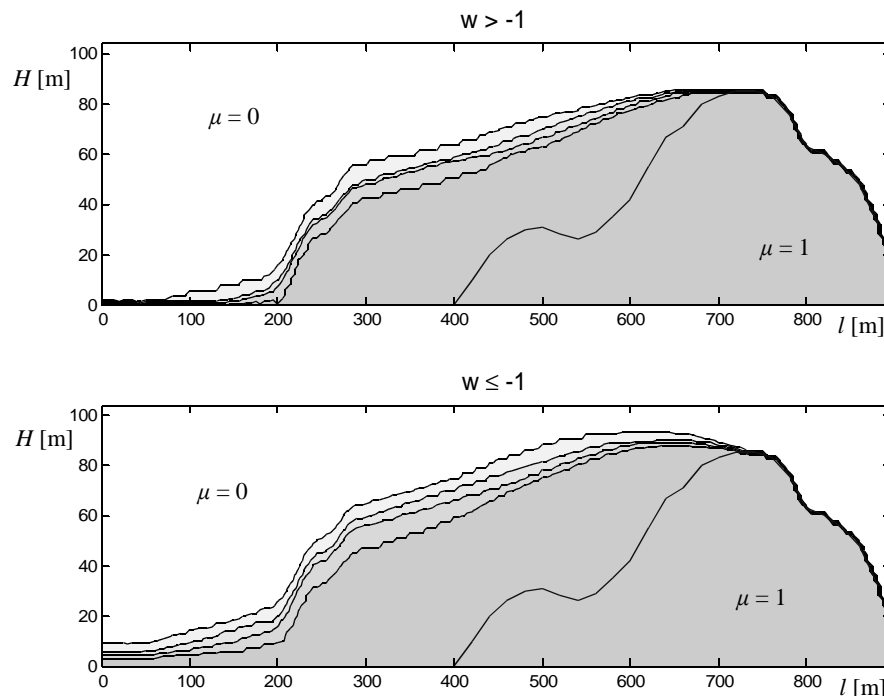


Rys. 4.7. Granice obszarów C dla kilku sposobów sterowania: a) stan początkowy – lot poziomy, b) stan początkowy – opadanie 4 m/s (dla skrajnych profili zaznaczono początkowe prędkości lotu)

Zaobserwowane różnice w realizacji manewru powodują, że w systemie ostrzeżeń konieczne jest uwzględnienie tego faktu. Porównanie charakterystyk umożliwi określenie sposobu sterowania u_{\max} prowadzącego do osiągnięcia maksymalnie stromego wznoszenia, jednak uzyskana na tej podstawie granica nie gwarantuje bezpieczeństwa, o ile nie zostanie zapewniona idealna realizacja manewru (np. przez automat przejmujący sterowanie, z zastrzeżeniem, że także w takim rozwiązaniu mogą wystąpić zakłócenia). Bardziej kompletny obraz sytuacji wymaga rozróżnienia stanów o różnym poziomie zagrożenia bezpieczeństwa. Jeśli zbiory C i C' będą zbiorami rozmytymi, wtedy przynależność do zbioru C' w naturalny sposób odzwierciedli poziom zagrożenia.

Przed przedstawieniem opisu matematycznego zostanie zaprezentowany opis werbalny poziomu zagrożenia. Oczywiste jest, że stan, przy którym nie istnieje możliwość sterowania ratującego przed katastrofą, jest stanem katastrofalnym. Granicę dla stanów bezpiecznych determinuje istnienie sterowania bez-

piecznego. Jeśli dla danego stanu pilot ma wiele możliwości reakcji, niepowodujących zagrożenia, to taki stan jest bezpieczny, natomiast redukcja zbioru dopuszczalnych sterowań zmniejsza poziom bezpieczeństwa. Stąd profil granicy C najbliższy C_z na rys. 4.8 to stan $\mu_z = 0$.



Rys. 4.8. Prezentacja wartości oceny poziomu zagrożenia w zależności od położenia samolotu

Niech zbiór $U_p \subset U$ zawiera te sterowania, które realizuje pilot w określonej sytuacji. Dla danego stanu określonego przez y sterowanie $u_k \in U_p$ prowadzi do stanu niedopuszczalnego lub poprawnego. Istnieją zatem dwa rozłączne podzbiory $U_{p,d}$ (sterowania dopuszczalne) i $U_{p,z}$ (sterowania powodujące osiągnięcie stanu w C'). Niech $m(U_\alpha)$ będzie licznością zbioru U_α . Po wykonaniu eksperymentu poziom zagrożenia jest określony zależnością:

$$\mu(y) = \frac{m(U_{p,z})}{m(U_p)} \quad (4.24)$$

Odnosząc podaną miarę zagrożenia do właściwości człowieka, można ją wykorzystać na dwa sposoby:

- indywidualny – kiedy zbiór U_p jest tworzony dla konkretnej osoby na podstawie jej działań,
- ogólny – kiedy zbiór U_p odzwierciedla typowe sposoby działań w rozpatrywanej populacji.

Na podstawie wyników eksperymentu wyznaczono wartości miary (zależność (4.24)) dla otoczenia pewnej przeszkody. Na rysunku 4.8 wyliczone wartości są reprezentowane przez poziom szarości. Wyróżnienie dwóch zbiorów stanów lotu początkowego: zbliżonego do poziomego ($w > -1$) i opadania ($w < -1$), wynika ze stwierdzenia niewielkich różnic w reakcji samolotu dla stanów w jednym zbiorze i znacznej zmienności pomiędzy zbiorami.

4.3.5. Zabezpieczenie przed przekroczeniem ograniczeń

Wprowadzenie zabezpieczenia przed przekroczeniem ograniczeń jest istotne dla bezpiecznego sterowania wieloma rodzajami obiektów. W odniesieniu do samolotów z systemami sterowania pośredniego wprowadzenie zabezpieczeń przed przekroczeniami obszaru dopuszczalnych stanów jest uznawane za warunek prawidłowego działania [195].

W literaturze istnieje wiele rozwiązań wykorzystujących różne metody modyfikacji sterowania, mające na celu zabezpieczenie przed przekroczeniami. Ogólnie można wyróżnić metody polegające na modyfikacji:

- 1) sygnałów sterujących obiektem (sygnał u w modelu procesu sterowanego, np. w postaci wzoru (3.9)) – *control limiting*,
- 2) celu sterowania, czyli sygnału zadanego dla regulatora – *command limiting*,
- 3) sposobu sterowania, czyli działanie regulatora zmienia się w pobliżu ograniczeń – *constrained control law*.

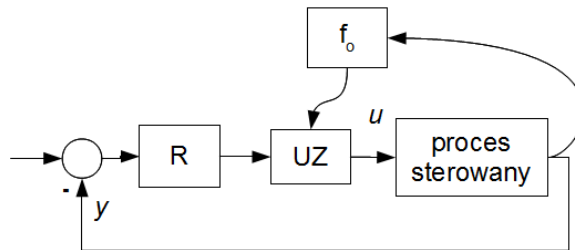
W opracowaniu [76] wyróżniana jest także czwarta metoda, nazwana ograniczeniem wirtualnych sygnałów sterujących (*virtual control limiting*), podobna strukturalnie do metody 1., z tym że wprowadzona została część układu sterowania w wewnętrznej pętli, linearyzująca charakterystyki procesu sterowanego. W opisie poszczególnych struktur sygnały u , y , y_d są wektorami o odpowiednich wymiarach.

Ad 1. Metody, w których układ zabezpieczający (UZ) modyfikuje sygnał sterujący, aby zapobiec przekroczeniom, są realizowane w strukturze przedstawionej na rys. 4.9. Wprowadzony element, analizując stan obiektu (f_o) zmienia tak sygnał sterujący, aby zapobiec przekroczeniom.

Należy zauważyć, że bezpośrednia zmiana sygnału sterującego powoduje zmianę sposobu reakcji obiektu, a nawet całkowity brak reakcji, gdy sygnał sterujący osiąga wartości graniczne. Ten efekt wymaga uwzględnienia przy projektowaniu układu sterującego automatycznie lub wspomagającego człowieka

w procesie sterowania. W tym drugim przypadku ma się do czynienia z praktycznym pozbawieniem możliwości sterowania, czyli z sytuacją niespodziewaną dla człowieka. O ile w sytuacji niebezpiecznej, na którą człowiek reaguje błędnie, jest to uzasadnione, to przy ograniczeniach innego typu może doprowadzić do sytuacji niebezpiecznej.

Rys. 4.9. Struktura układu zabezpieczenia z bezpośrednim oddziaływaniem na sygnał sterujący



Ograniczenie sygnału sterującego niekoniecznie gwarantuje ograniczenie wartości zmiennych stanu. Układ analizujący powinien oceniać nie tylko stan aktualny, ale także stany przyszłe. Przykładowo, w opracowaniu [114] zastosowano metodę dynamicznego trymowania, w której przewidywane wartości sygnału w założonym horyzoncie czasowym (Δt) są opisywane zależnością

$$y(k+1) = y(k) + \Delta t (C \cdot A \cdot x + C \cdot b \cdot u + v(x, u)) \quad (4.25)$$

gdzie v jest funkcją uwzględniającą nieliniowości, modelowaną przez sieć neuronową. Dla sygnału sterującego określone są granice wynikające z ograniczenia sygnału y :

$$u_{ogr} = \frac{(C \cdot A \cdot x \cdot \Delta t - y_{ogr} + y + \Delta t \cdot v(x, u_{ogr}))}{b \Delta t} \quad (4.26)$$

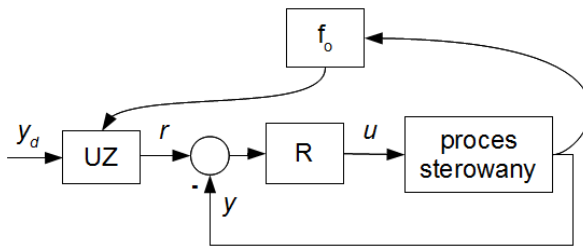
dla $ogr \in \{upper, lower\}$. Uwzględnienie wielu sygnałów i faktu występowania wartości u_{ogr} po obydwu stronach równania odbywa się przez wykorzystanie algorytmu iteracyjnego dla wszystkich zmiennych branych pod uwagę, przy czym kolejność sprawdzania wynika z przyjętych priorytetów. Dodatkowo autorzy zaproponowali algorytm wyliczający maksymalne wartości ograniczanych zmiennych, służący do ustalenia priorytetów.

Kolejnym problemem pojawiającym się w tej strukturze jest zagadnienie stabilności i niekorzystnych charakterystyk procesów przejściowych. W sytuacji ograniczenia wartości sygnałów u następuje odłączenie regulatora R , który zwykle kształtuje charakterystyki odpowiednio do wymagań.

Ad 2. Metody, w których układ zabezpieczający modyfikuje sygnał zadany regulatora, działają w strukturze przedstawionej na rys. 4.10. Zadawany przez

regulator nadrzędny lub człowieka sygnał określający wartości zadane stanu jest w tej strukturze modyfikowany przez element oceniający. W algorytmie oceny uwzględniane są różnego rodzaju ograniczenia.

W najprostszej wersji, gdy ograniczenie dotyczy bezpośrednio zmiennej y lub na podstawie zmiennej, której wartość jest ograniczona i można wyliczyć ograniczenia dla zmiennej y , działanie układu jest oczywiste. Może się jednak zdarzyć, że w zależności od stanu lotu istotne są inne zmienne. Przykład takiego zagadnienia dotyczy zaprezentowanego w pracach [310, 311] sterowania śmigłowcem, kiedy w zależności od sytuacji uwzględniano wartości przeciążenia, prędkości kątowej i możliwość przeciągnięcia łopaty wirnika.



Rys. 4.10. Struktura układu zabezpieczeń z modyfikacją sygnału sterującego

Bardziej złożone przypadki występują wówczas, gdy ograniczenia dotyczą wielu zmiennych (pkt 4.3.3), co prowadzi do poszukiwania najlepszego przybliżenia sygnału zadawanego, czyli optymalizacji z ograniczeniami [77]. Wartość $r(k)$ jest najlepszą aproksymacją wartości zadawanych przez układ nadrzędny y_d w kroku k , minimalizującą wskaźnik jakości przy założonych ograniczeniach:

$$J(y_d, r(k)) = \min_{u \in U_d} J(y_d, \hat{y}(u)) \quad (4.27)$$

Ogólnie wskaźnik J jest nieujemnie określoną funkcją argumentów, np. w postaci:

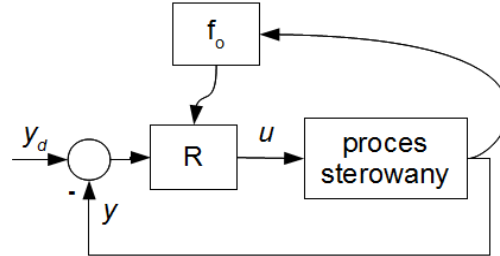
$$J(y_d, y) = (y_d - y)^T Q (y_d - y) \quad (4.28)$$

z symetryczną i dodatnio określoną macierzą Q .

Istotnym zagadnieniem jest tutaj określanie dopuszczalnych sterowań, czyli zbioru sterowań U_d , dla którego przewidywane wartości sygnałów wyjściowych \hat{y} i stanu \hat{x} spełniają założone ograniczenia. Zadanie optymalizacji kwadratowej rozwiązywane metodami iteracyjnymi stawia stosunkowo wysokie wymagania co do mocy obliczeniowej, zwłaszcza przy wzroście wymiaru przestrzeni zmiennych ograniczanych.

Ad 3. Zmiana sposobu działania regulatora oznacza dla układu nadrzędnego zmianę charakterystyk obiektu, lecz w odróżnieniu od poprzednich metod modyfikacja ma zapewnić minimalizację błędu sterowania przy uwzględnieniu ograniczeń. Strukturę ogólną takiego sposobu działania przedstawia rys. 4.11.

Rys. 4.11. Modyfikacja działania regulatora zapewniająca zabezpieczenie przed przekroczeniem ograniczeń



Praktyczna realizacja idei sterowania z ograniczeniami wymaga oceny stanu w przedziale czasu wynikającym z założonego horyzontu czasowego i poszukiwania wartości sygnałów sterujących u ze zbioru sterowań dostępnych i spełniających warunek nieprzekroczenia ograniczeń wartości sterujących U_d i ograniczeń stanu X_d . Możliwa jest wówczas minimalizacja założonego wskaźnika jakości sterowania J :

$$u(k) = \arg \min_{u \in U_d} J(y_d - \hat{y}(u)) \quad (4.29)$$

Rozwiązanie tak sformułowanego zadania przy przyjęciu założeń upraszczających prowadzi do zadania optymalizacji z ograniczeniami. Sterowanie bezpośrednio realizujące tę ideę to metody sterowania predykcyjnego [43, 163]. Obliczenie przyszłych stanów na podstawie modelu obiektu wymaga niestety stosunkowo dużej mocy obliczeniowej, co stanowi istotną przeszkodę w praktycznym wykorzystaniu opisywanej metody. Inną możliwością zaproponowaną w opracowaniu [76] jest przełączanie pomiędzy różnymi regulatorami w zależności od oceny aktualnego stanu.

Wnioski dotyczące zastosowania układów zabezpieczających stan samolotu (*flight envelope protection*) zaprezentowane w pracy [76] pozwalają na stwierdzenie, że najlepsze właściwości ma układ 2. Cechuje się najlepszą przewidywalnością (układ 3. może dopuścić do przekroczenia założonych wartości), odpornością na zmiany modelu (układ 1. wykorzystujący bezpośrednio model w predykcji jest szczególnie wrażliwy, gdy nie zastosuje się dodatkowych elementów kompensujących niedokładność modelu), odpornością na występowanie zakłóceń i prostotą realizacji (wymaga jedynie wprowadzenia ograniczenia na sygnałach zadanych regulatora, jeśli nie jest to wersja z optymalizacją).

Wprowadzenie zabezpieczenia, pozwalającego uniknąć przekroczenia ograniczeń przy sterowaniu przez człowieka, wpływa na świadomość sytuacyjną.

Zadziałanie układu 1. po odłączeniu regulatora spowoduje pogorszenie charakterystyk procesu sterowanego.

W układzie 2. regulator będzie nadal kształtował charakterystyki, pilot natomiast będzie stwierdzał brak reakcji w określonych sytuacjach. Układ, w którym ograniczenia nie są zbyt ostrożne, czyli nieograniczający możliwości sterowania, gdy nie jest to konieczne, powinien być przez pilota zaakceptowany. Charakterystyki uzyskane w układzie 3. zależą od algorytmu optymalizacji sterowania. Można się spodziewać, że zmiany sposobu reakcji mogą być mylące dla pilota, w odróżnieniu od układu 2., gdzie zmiana jest jednoznaczna.

Opisane układy zabezpieczeń dotyczą ograniczeń sztywnych, których wprowadzenie oznacza uniemożliwienie działania człowieka w obszarze zabronionym, a zatem podjęcie decyzji przez system zabezpieczeń skutkuje jej realizacją. Przy wprowadzeniu mechanizmów negocjowania decyzja może mieć formę ostrzeżenia bądź sugestii co do sposobu działania. Sygnał ostrzeżenia ma postać siły reakcji organu sterowego, który zadaje wartość y_d . Ze względu na bezpośredni związek tej informacji z sygnałem zadawanym układ taki musi pracować w strukturze 2.

Porównanie systemów sterowania w samolotach firm Airbus (ograniczenia sztywne) i Boeing (ograniczenia miękkie) [22, 155, 236] sugeruje, że piloci, akceptując obie formy, chcą mieć możliwość awaryjnego przekroczenia ograniczeń przez pilota odpowiedzialnego za realizację lotu. Ograniczenia sztywne stawiają wysokie wymagania co do niezawodności i dokładności określenia granic obszarów niebezpiecznych.

5. MODYFIKACJE CHARAKTERYSTYK PROCESU STEROWANEGO

5.1. Wstęp

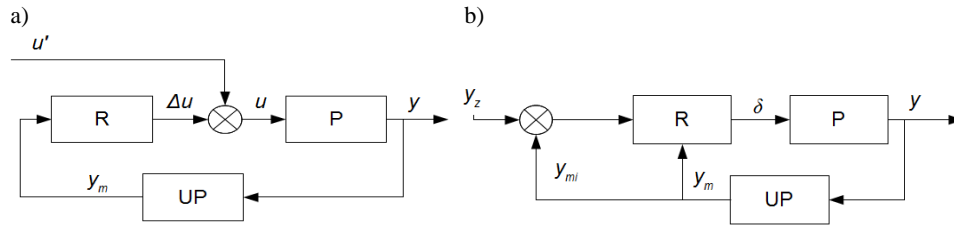
Podczas realizacji procesu sterowania na poziomie umiejętności (sterowania bieżącego) człowiek wykorzystuje modele wewnętrzne procesu sterowanego do kształtowania oraz oceny efektów sterowania. W zakresie sterowania bieżącego istnieje możliwość wprowadzenia rozwiązań ułatwiających realizację procesu sterowania, których skutkiem jest zmiana właściwości obiektu sterowanego odbieranych przez człowieka. Lepiej dopasowana do właściwości człowieka charakterystyka powinna ułatwiać realizację sterowania. Kształtowanie może obejmować zarówno interfejsy sterujące oraz informacyjne, jak i modyfikację charakterystyk samego procesu sterowanego przez wprowadzenie układów automatycznego sterowania. Układy zabezpieczające przed osiągnięciem stanów niepoprawnych (pkt 4.3.5) w efekcie swojego działania także zmieniają charakterystyki procesu sterowanego. Jednak, ponieważ należy je analizować w odniesieniu do wszystkich poziomów działania człowieka, zostaną omówione w rozdz. 7.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano kilka metod kształtowania charakterystyk procesu sterowanego w zadaniach sterowania procesem dynamicznym przez człowieka.

5.2. Modyfikacja procesu sterowanego

5.2.1. Wpływ układów automatycznego sterowania na charakterystyki procesu sterowanego przez człowieka

Charakterystyki procesu dynamicznego dla obiektu sterowanego nie zawsze są korzystne podczas realizacji procesu sterowania przez człowieka. Wprowadzenie układu pracującego zgodnie z ideą przedstawioną na rys. 5.1a powoduje zmianę reakcji na sygnał sterujący (teraz u' , modyfikowany przez sygnał Δu z regulatora R, wykorzystującego mierzone wartości zmiennych wyjściowych y_m). W lotnictwie tego typu układy są stosowane do stabilizacji samolotów niestatecznych (SAS – *stability augmentation system*) oraz poprawy właściwości pilotażowych [23, 46, 268, 284].



Rys. 5.1. Schemat układu modyfikującego charakterystyki procesu sterowanego: a) bez zmiany znaczenia sygnału wejściowego, b) ze zmianą znaczenia sygnału wejściowego; R – regulator modyfikujący, P – proces sterowany, UP – układ pomiarowy

Wprowadzenie układu o strukturze jak na rys. 5.1b powoduje zarówno zmianę charakterystyk dynamicznych, jak i znaczenia sygnału wejściowego. Oznaczenie sygnału y_z odzwierciedla więc fakt, że w tej strukturze zadawana jest wartość pewnej zmiennej wyjściowej y_i ($y_m \in \mathbb{R}^p$, $y_i \in \mathbb{R}$).

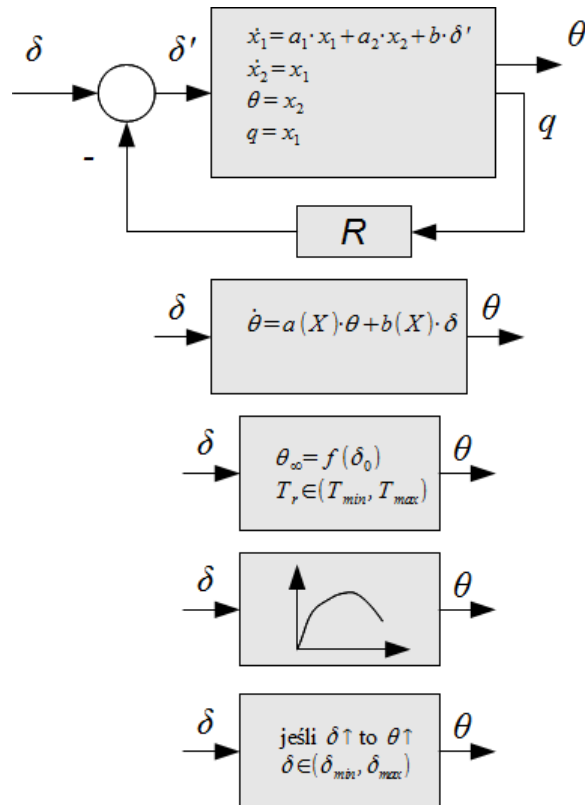
Celem zilustrowania efektu wprowadzenia regulatora modyfikującego charakterystyki procesu sterowanego zostanie przedstawiony proces redukcji opisu procesu dynamicznego, aż do uzyskania uproszczonego modelu werbalnego [261].

Mimo że we wstępie zaprezentowano negatywne efekty wynikające ze wzrostu złożoności systemów jako efektu zastosowania automatyki, to odpowiednie rozwiązania przyczyniają się do uproszczeń nie tylko dotyczących sposobu działania. **Zastosowanie układów automatyki może także spowodować uproszczenie modelu efektywnego opisującego system.**

Za przykład niech posłuży przedstawiona analiza efektu wprowadzenia w systemie sterowania ruchem samolotu tłumika pochylania. Element ten, pracujący w strukturze jak na rys. 5.1a, zmienia charakter oscylacyjny reakcji samolotu na zbliżony do aperiodycznego. Na rysunku 5.2 w pierwszym etapie wprowadzono regulator R. W nowym, uproszczonym modelu nie trzeba uwzględniać prędkości kątowej, a opis został uproszczony do równania pierwszego rzędu.

Gdy charakter odpowiedzi zmodyfikowanego układu na wymuszenie skokowe jest aperiodyczny (lub przynajmniej brak jest oscylacji), to przybliżony model można opisać jako zależność wartości kąta pochylecia w stanie ustalonym od wychylenia steru wysokości. Dodatkową informacją jest przedział czasu, po którym następuje ustalenie nowej wartości kąta. Opis w stanach ustalonych można zatem przedstawić jako charakterystykę statyczną, co zostało przedstawione jako efekt redukcji w kolejnym etapie.

Ostatni etap redukcji prowadzi do prostego modelu werbalnego: *jeśli zwiększysz wychylenie steru, to nastąpi zwiększenie pochylecia do nowej wartości ustalonej, pod warunkiem że sygnał sterujący nie przekracza wartości granicznych.*



Rys. 5.2. Przykład redukcji modelu efektywnego

5.2.2. Bezpośrednia metoda kształtowania właściwości pilotażowych samolotów lekkich według modelu (wzorca)

Modyfikacja charakterystyk samolotu ma na celu kształtowanie właściwości pilotażowych sterowanego samolotu, odczuwanych przez pilota jako sposób reakcji samolotu na jego działanie (sterowanie). Pożądane cechy pilotażowe zostały zebrane w formie różnych kryteriów [23, 284]. Z analizy kryteriów wynika możliwość określenia pewnych właściwości pożądanych charakterystyk, takich jak:

- tłumienie ok. 0,7 i pulsacja oscylacji własnych w przedziale 2,4-3,6 rad/s dla modu pochylania,
- stała czasowa ruchu przechylania w zakresie 1,3-1,7 s zależnie od stanu lotu.

Wprowadzenie układu zmieniającego charakterystyki powoduje także tłumienie zakłóceń. Jest to efekt korzystny, jednak całkowite wytłumienie zakłóceń może mieć negatywne konsekwencje, o których przekonali się konstruktorzy

automatu kompensującego kąt ślizgu samolotu A380 [94]. Okazało się, że w sytuacji awarii silnika podstawowym sygnałem ostrzegawczym odbieranym przez pilota jest ruch samolotu, który automat zbyt skutecznie kompensował. Obrazuje to trudność w jednoznacznym określeniu, jakie powinny być modelowe charakterystyki samolotu.

W samolocie z systemem pośredniego sterowania możliwe jest kształtowanie oczekiwanej reakcji samolotu na polecenia pilota przekazywane przez wychylenia organów sterowania. Metodą, w której jest bezpośrednio wykorzystywany model wzorcowej reakcji, jest sterowanie według modelu MFC (*Model Following Control*). Sterowanie według modelu jest metodą optymalizacyjną, posiadającą cechy adaptacyjnej metody sterowania nadążnego. Metodyka sterowania według modelu [10], stosowana do kształtowania charakterystyk samolotów [283, 285] oraz aparatów bezzałogowych [281], została dostosowana do postaci parametryzowanych modeli liniowych.

Niech model samolotu ma ogólną postać wzoru (3.2), gdzie dodatkowo przyjęto założenie: $u \in U \subset^m$, przy czym U jest zbiorem otwartym, a dodatkowo – ze względu na fizyczne ograniczenia sterowań – jest także zbiorem ograniczonym.

Niech x_0 będzie punktem w przestrzeni stanów opisującym stan, w którym znajduje się samolot przy ustalonych wartościach sygnałów sterujących u_0 . Wartości x_0 i u_0 spełniają równanie:

$$0 = f(x_0, \pi) + g(x_0, \pi)u_0 \quad (5.1)$$

Model samolotu dla małych odchyłeń Δx od stanu x_0 będzie przybliżony równaniem:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{x} &= \left(\frac{\partial f(x, \pi)}{\partial x} \right)_{x=x_0} \Delta x + g(x_0, \pi) \Delta u \\ y &= h(x_0 + \Delta x) \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

Parametry macierzy modelu w postaci wzoru (5.2) zależą także od zmian masy i wyważenia samolotu oraz gęstości powietrza. Opis właściwości dynamicznych można zatem przedstawić jako zbiór macierzy $\{A_k, B_k\}$ współczynników równań liniowych o postaci:

$$\Delta \dot{x} = A_k \Delta x + B_k \Delta u \quad (5.3)$$

natomiast funkcja:

$$\chi \rightarrow \Xi = \{A_k, B_k\} \quad (5.4)$$

odwzorowuje zbiór parametryzujący stan lotu $\chi = \{x_0, \pi, \rho\}$ w zbiór parametrów równań.

Niech model referencyjny spełniający założone kryteria będzie dany w postaci zależności:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_m &= f_m(x_m) + g_m(x_m)u \\ y_m &= h_m(x_m) \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Ogólna postać prawa sterowania jest następująca:

$$u = K_u u + K_m y_m + K_s y \quad (5.6)$$

Parametry układu sterownia zawiera więc macierz wzmocnień $K = [K_u, K_m, K_s]$. W dalszych rozważaniach zostanie przyjęte, że macierz wzmocnień nie ma elementów tożsamościowo równych zero, czyli istnieje sprzężenie od wszystkich zmiennych wyjściowych.

Ogólny błąd sterowania według modelu opisuje wzór:

$$e = H_m y_m - H_s y \quad (5.7)$$

Postać macierzy H powinna odpowiadać oczekiwanym efektom sterowania i dla bezpośredniej oceny uchybu $e_i = y_{m,i} - y_i$ (przy założeniu odpowiedniego posortowania zmiennych w wektorach, co nie powoduje utraty ogólności rozważań) odpowiednie elementy macierzy powinny być równe: $H_{m,(i,i)} = H_{s,(i,i)}$.

Ocenę jakości dla pewnego K realizuje funkcjonał:

$$J(K) = \int_0^T \Psi(e(t), u(t), t) dt \quad (5.8)$$

W szczególności może to być funkcjonał zdefiniowany przez dodatnio określoną macierz Q i nieujemnie określoną macierz R :

$$\Psi(e(t), u(t), t) = e^T Q e + u^T R u \quad (5.9)$$

Minimalizacja funkcjonału przy małych odchyleniach od stanu ustalonego pozwala na znalezienie funkcji $K(y_0, \pi)$, gdzie $y_0 = h(x_0)$, spełniającej warunek:

$$J(K(y_0, \pi)) = \min_{K \in \mathcal{K}} J(K) \quad (5.10)$$

Dopuszczalne wartości macierzy wzmocnień determinuje zbiór \mathbf{K} . Ze względu na ograniczoną wartość T , co w praktyce wynika z ograniczonego czasu symulacji, nie ma gwarancji, że przedstawione rozwiązanie (wzór (5.10)) będzie stabilne. Dlatego zbiór rozwiązań składa się z rozłącznych podzbiorów $\mathbf{K} = \mathbf{K}_s \cup \mathbf{K}_n$, gdzie \mathbf{K}_s są wartościami wzmocnień, dla których sterowany układ jest stabilny, natomiast \mathbf{K}_n to wartości wzmocnień, dla których układ jest niestabilny. Teraz rozwiązanie będzie poszukiwane tylko w zbiorze rozwiązań stabilnych:

$$J(K(y_0, \boldsymbol{\pi})) = \min_{K \in \mathbf{K}_s} J(K) \quad (5.11)$$

Rozważmy, czy jest możliwe, aby $\mathbf{K}_s = \emptyset$.

1. Jeśli model ruchu samolotu jest stabilny, to wtedy niezależnie od wyboru K_u istnieją odpowiednio małe⁶ K_1 i K_2 , takie że $[K_u, K_1, K_2] \in \mathbf{K}_s$, co przeczy tezie.
2. Jeśli model ruchu samolotu jest niestabilny, to wtedy brak rozwiązania stabilnego może wynikać:
 - a) z niepoprawnej struktury układu sterującego, co oznacza konieczność modyfikacji równania wyjścia $y = h(x)$ i wprowadzenia dodatkowych zmiennych wyjściowych,
 - b) z niemożności stabilizacji przy ograniczeniu sygnału sterującego i przy zastosowanej strukturze układu sterującego z liniowym sprzężeniem zwrotnym od zmiennych wyjściowych, co oznacza, że:
 - sterowanie jest niemożliwe wobec braku możliwości stabilizacji,
 - jeśli niestabilność taka występuje, w ograniczonym zbiorze stanów istnieje pewne sterowanie sprowadzające do stanów, w których stabilizacja jest możliwa.

Niemożność sterowania z powodu niestabilności globalnej świadczy o źle postawionym zadaniu sterowania. Jeśli przyczyną są ograniczenia wprowadzane przez elementy układu sterowania (elementy wykonawcze, układy przetwarzające czy układy pomiarowe), to należy rozważyć ich wymianę.

Lokalna niestabilność w modelu samolotu występuje chociażby w zakresie dużych kątów natarcia i wtedy trudno mówić o jakości sterowania. Stąd wniosek, że kształtowanie charakterystyk obiektu sterowanego według modelu będzie dotyczył zakresu normalnej eksploatacji, a zagadnienie stanów nadzwyczajnych należy rozwiązywać w inny sposób.

⁶ W sensie normy.

5.3. Modyfikacja charakterystyk interfejsów

5.3.1. Informacja, percepcja i koszt informacji

Charakterystyki interfejsów informacyjnych uczestniczą w przekazie sygnałów wyjściowych, natomiast charakterystyki interfejsów sterujących wpływają na odbiór reakcji na działania sterujące.

Dla interfejsów informacyjnych zaawansowanych wskaźników lotniczych została sformułowana definicja kompatybilności kognitywnej. **Kompatybilność kognitywna** zaawansowanych wskaźników lotniczych polega na prezentacji informacji zgodnej z wewnętrznymi procesami umysłowymi i wiedzą człowieka, z uwzględnieniem czucia, percepcji, myślenia, wyobrażenia i rozumowania (*Cognitive compatibility of advanced aircraft displays is the facilitation of goal achievement through the display of information in a manner which is consistent with internal mental processes and knowledge, in the widest sense, including sensation, perception, thinking, conceiving and reasoning* [109]). Zgodność przekazu z procesem przetwarzania informacji i wewnętrzną reprezentacją jest oczywistym wymaganiem, którego realizacja obejmuje wszystkie fazy procesu przetwarzania informacji przez człowieka.

Informacja niezbędna do realizacji sterowania czy podejmowania decyzji jest odbierana przez receptory i mechanizm percepcji. Odbiór informacji przez zmysły różni się jednak od pomiarów technicznych. O ile przy klasycznych pomiarach stosuje się skale fizyczne, które cechują się powtarzalnością i obiektywizmem, to przetwarzanie przez zmysły podlega wielu czynnikom: zarówno zewnętrznym, jak i wynikającym ze sposobu, w jaki funkcjonuje człowiek. Stąd odbiór informacji nie musi być procesem powtarzalnym.

Analizując ogólnie sposób działania receptorów, opracowano modele, które określają, jaki efekt wywołuje sygnał działający na receptor. Próby opisu zależności pomiędzy poziomem pobudzenia bodźcem I a poziomem odbieranym/postrzeganym F (*perceptual variable*) podejmowano już w XIX w. Sformułowano wówczas podstawowe prawa opisujące odwzorowanie wielkości fizycznych przez percepcję. Prawa te nie zostały zakwestionowane, chociaż ciągle są prowadzone badania zarówno z zakresu dopracowania szczegółów opisu, jak i znalezienia przyczyn w fizjologii człowieka. Podstawą opisu jest skala psychofizyczna [26]:

$$F = u(I) \quad (5.12)$$

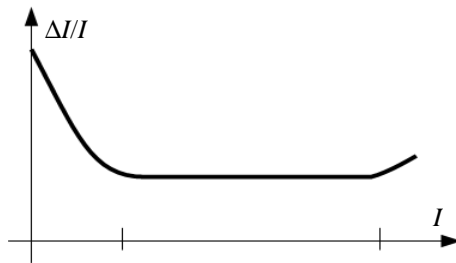
która zachowuje porządek i jest ściśle monotoniczna.

Prawo Webera stwierdza, że próg detekcji zmiany wielkości pobudzenia zależy od wartości tego pobudzenia, zgodnie z zależnością:

$$w = \frac{\Delta I}{I} = \text{const} \quad (5.13)$$

Wartość ilorazu (5.13) nosi nazwę współczynnika Webera (*Weber fraction*). Badania empiryczne pokazały, że dla większości wielkości obserwuje się odchylenia od prawa Webera przy małych oraz dużych pobudzeniach. Ten sposób reprezentacji pobudzenia przenosi się na interpretację przez człowieka wartości liczbowych. Przeprowadzone badania wskazują, że także w tym zakresie obowiązują logarytmiczne zależności [59].

Typową charakterystykę współczynnika Webera w zależności od pobudzenia przedstawia rys. 5.3. Wartości współczynników Webera są różne, w zależności od zmysłu, którego dotyczą (niestety, także wyniki prezentowane przez poszczególnych badaczy się różnią, co obrazuje zmienność parametrów tego modelu percepcji), chociaż wartości mieszczą się w zakresie od kilku do kilkunastu procent. Dla siły najczęściej podawana jest wartość ok. 6%. Percepcja ruchu cechuje się mniejszą rozdzielczością – podawane są wartości współczynnika Webera z zakresu od 10 do 17%. W wyniku jednego eksperymentu stwierdzono nawet wartość 23% [190].



Rys. 5.3. Współczynnik Webera w zależności od poziomu pobudzenia – charakterystyka hipotetyczna

Hipotetyczne równania opisujące skalę psychofizyczną zostały podane jako:

- prawa Fechnera

$$F = a \cdot \log I + b \quad (5.14)$$

- wykładnicza skala Stevensa

$$F = k I^n \quad (5.15)$$

- wykładnicza skala Ekmana

$$F = k (I + a)^n \quad (5.16)$$

Zależność (5.16) odzwierciedla spadek współczynnika Webera przy małych pobudzeniach.

Kolejny problem z dokładnym odwzorowaniem skali psychofizycznej obrazuje pojęcie minimalnej zauważalnej różnicy *jnd* (*just-noticeable difference*).

Wartość jnd można określić jedynie w kategoriach statystycznych. Zwykle przyjmuje się, że jest to taka wartość, dla której prawdopodobieństwo stwierdzenia różnicy względem wartości odniesienia wynosi 75%, chociaż ze względu na arbitralność wyboru wartości progowej inne wartości prawdopodobieństwa są także dopuszczalne. Istnieją również modele, w których jest uwzględniany parametr poziomu prawdopodobieństwa [12].

Odbiór informacji podlega dodatkowo procesowi adaptacji [196], czyli z upływem czasu t następuje zmniejszenie poziomu odbieranego mimo stałego poziomu pobudzenia. Efekt ten ma wytłumaczenie fizjologiczne i wynika wprost ze sposobu pracy układu nerwowego. Analitycznie tę właściwość opisuje zależność:

$$F = \frac{1}{2}k \log(1 + \beta I^n / t) \quad (5.17)$$

gdzie: k, β, n – współczynniki.

Istnieją dwie interpretacje zmiennej F . Definiuje się ją jako subiektywną ocenę poziomu bodźca (czyli ocenę mentalną poziomu pobudzenia) bądź intensywność reakcji neuronów (czyli parametru fizjologicznego).

Użytecznym narzędziem do analizy informacji jest pojęcie entropii. Dla opisu informacji w kanałach transmisyjnych zostało wykorzystane pojęcie entropii H , z uwzględnieniem rozkładu prawdopodobieństwa $p(y)$ zmiennej losowej Y [196, 253] dla zmiennej ciągłej:

$$H(Y) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(y) \log_2 p(y) dy \quad (5.18)$$

i dyskretnej przyjmującej n wartości:

$$H(Y) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (5.19)$$

Wartość entropii podana w zależnościach (5.18) i (5.19) określa zawartość informacyjną sygnału wyrażoną w bitach. Stąd entropia jest miarą niepewności co do wartości danego sygnału. Jeśli wartość sygnału byłaby znana, to wtedy wartość entropii będzie zerowa. Sygnał o zerowej entropii nie niesie żadnej informacji, co pozwala na uznanie takiego sygnału za zbędny. Jeśli taką właściwość ma sygnał uchybu sprzężenia zwrotnego, to oznacza, że wystarczające jest sterowanie w układzie otwartym.

Informacja w procesie sterowania jest wykorzystywana do określenia sposobu działania, co dotyczy zarówno zagadnień podejmowania decyzji z dłuższą perspektywą czasową, jak i sterowania bieżącego. Na poziomie zadań sterowa-

nia bieżącego istotne jest nie tylko przekazanie odpowiednich wartości sygnałów, ale także czas, w jakim informacja zostanie odebrana, a następnie czas konieczny na realizację działania. Czas reakcji jest zatem wielkością wykorzystywaną w wielu badaniach do określenia efektywności działania człowieka [193]. Z modeli przetwarzania informacji przez człowieka wynika, że czas reakcji określa szybkość, z jaką następuje przetwarzanie informacji przez człowieka, obejmując wszystkie procesy od zadziałania bodźców na receptory do uruchomienia efektorów. W zadaniach polegających na ocenie stanu aktualnego i realizacji adekwatnego działania czas reakcji, poza poprawnością reakcji, jest podstawowym wskaźnikiem efektywności pracy operatora. W zadaniach realizowanych na poziomie umiejętności (SBB) czas reakcji zależy głównie od właściwości fizjologicznych, czyli opóźnień sygnałów w układach percepcji i motorycznym. W zadaniach realizowanych na wyższych poziomach czas reakcji RT określa dodatkowo efektywność procesów umysłowych uczestniczących w podejmowaniu i realizacji decyzji.

W zakresie prostych reakcji RT zależy od intensywności bodźca I zgodnie z zależnością:

$$RT = RT_{\min} + k \cdot I^{-n} \quad (5.20)$$

gdzie k jest pewnym współczynnikiem proporcjonalności.

Przykładowo, dla reakcji na dźwięk zmiany obejmują wartości od 0,11 do 0,40 s (przy ciśnieniu akustycznym odpowiednio 10^5 Pa i 1 Pa) [196].

Zgodnie z prawem Hicka–Haymana [251] czas reakcji RT jest opisany zależnością:

$$RT = a + b \cdot H_T \quad (5.21)$$

w której H_T jest miarą informacji (entropią), a wartości współczynników zależą od rodzaju zadania. Prawo to dobrze opisuje działanie operatora realizującego zadania polegające na reakcji na kilka podobnych w formie wymuszeń o charakterze losowym. Zależność (5.21) jest zgodna z wieloma wynikami badań empirycznych i obrazuje wydłużenie czasu reakcji w efekcie zwiększania liczby możliwych stanów bądź liczby możliwych decyzji.

Podstawowym wnioskiem z zależności (5.21) jest możliwość uzyskania szybkich reakcji przez minimalizację równocześnie pojawiających się zdarzeń wymagających interwencji człowieka (stąd np. konieczność klasyfikacji alarmów i podejmowania zautomatyzowanych reakcji w przypadku wystąpienia wielu zdarzeń jednocześnie). Określenie wpływu liczby alarmów na czas reakcji jest zagadnieniem nieskomplikowanym. Dla n alarmów czas reakcji zwiększa się proporcjonalnie do $\log_2 n$. Oczywiście pozostaje kwestia współczynnika proporcjonalności b .

Informację dostarczaną przez m interfejsów informacyjnych określa zależność miary entropii:

$$H(y) = -\sum_{k=1}^m \int p_k(y_k) \log_2 p_k(y_k) dy_k \quad (5.22)$$

Z zależności (5.21) i (5.22) wynika dosyć oczywisty wniosek, że należy redukować informacje, które są zbędne. Równocześnie pojawia się przesłanka dla metody redukcji informacji zbędnych: należy zmieniać rozkłady prawdopodobieństwa sygnałów.

Niech sygnał przekazywany przez i -ty interfejs składa się z informacji istotnej dla procesu sterowania lub monitorowania y_i oraz szumu n_i :

$$r_i = y_i + n_i \quad (5.23)$$

Istotne jest rozróżnienie szumu od informacji istotnej, gdyż nie może to być proste przeniesienie pojęcia z dziedziny techniki. Sygnał o charakterze zakłócenia niezwiązanego z wartością zmiennej mierzonej jest szumem. Szumem jest także informacja, która nie jest istotna dla obecnie realizowanego procesu sterowania. Rozróżnienie szumu od informacji musi uwzględniać realizowane zadanie. Pomocne w tym względzie jest pojęcie wartości informacji, czyli miary tego, jak informacja przekłada się na efekt działania.

Do oceny istotności informacji konieczne jest określenie sposobu oceny realizacji zadania. Posłuży do tego pewien wskaźnik, który w tym miejscu nie będzie szczegółowo definiowany, gdyż należy go określać indywidualnie dla konkretnego zadania, uwzględniając specyfikę tego zadania. Wymaganą cechą wspomnianego wskaźnika jest to, aby był dodatnio określonym funkcjonałem na funkcjach zmiennych stanu dobranym w taki sposób, aby maksymalizacja wskaźnika oznaczała lepsze wykonanie zadania.

Definicja 5.1

Informację, która nie zwiększa wskaźnika jakości realizowanego zadania, należy traktować jako zakłócenie (szum informacyjny).

Informacja może oczywiście wymuszać zmianę zadania bieżącego, stąd wniosek, że ogólny wskaźnik jakości musi dotyczyć ogólnego celu określonego na poziomie strategicznym. Należy jednak pamiętać, że na czas reakcji wpływają różne czynniki, co powoduje, że wykorzystanie prawa Hicka–Haymanna wymaga ostrożności podczas oceny warunków realizacji testu. Wymaganie zaawansowanego przetwarzania informacji podczas realizacji zadania (co jest typowe, gdy są dostarczane informacje pośrednie zamiast bezpośrednio wynikających z zadania) sprawia, że czas reakcji będzie różny w zależności od umiejętności operatora. Założenie losowości sygnałów w rzeczywistych zadaniach także

nie jest spełnione i wówczas trening, modyfikujący sposób przetwarzania informacji może powodować, że w pewnym zakresie czas reakcji będzie niewrażliwy na zmianę informacji.

W zadaniach złożonych, wymagających monitorowania wielu wielkości, jest możliwe, że brak reakcji na pewne zmiany stanowi najlepszy sposób sterowania i wagi nabiera samo zagadnienie oceny ważności czynności.

Twierdzenie 5.1

Zmiana entropii przy zmianie rozproszenia rozkładu prawdopodobieństwa (czyli zmianie odchylenia standardowego) zmiennej ciągłej jest określona zależnością:

$$H(Y') = H(Y) + \log_2 \alpha \quad (5.24)$$

w której α jest wartością współczynnika opisującego zmianę poziomu rozproszenia rozkładu zmiennej Y' w stosunku do rozkładu zmiennej Y .

Dowód

$$\begin{aligned} H(Y') &= -\int p'(y) \log_2 p'(y) dy, \\ H(Y') &= -\int \frac{1}{\alpha} p\left(\frac{y}{\alpha}\right) \log_2 \frac{1}{\alpha} p\left(\frac{y}{\alpha}\right) dy, \\ H(Y') &= -\int \frac{1}{\alpha} p(y') \log_2 \frac{1}{\alpha} p(y') \alpha \cdot dy', \\ H(Y') &= H(Y) + \log_2 \alpha. \end{aligned}$$

Niestety, dla zmiennej dyskretnej zależność (5.24) można traktować jako przybliżenie, które jest tym gorsze, im odchylenie standardowe jest bliższe rozdzielczości, z jaką wartość danej zmiennej jest widziana.

Wartość informacji pozwala na ocenę przydatności informacji odbieranej. W artykule [257] została podana zależność:

$$V_{avg}^x = V_{avg} - V'_{avg} - C \cdot H \quad (5.25)$$

w której posłużono się pojęciami zysku (*reward*) V_{avg} – gdy wykorzystywana jest informacja aktualna oraz V'_{avg} – gdy wykorzystuje się jedynie znajomość rozkładu prawdopodobieństwa $p(y)$. Wskaźnik ten został zaproponowany do oceny systemów transportu lotniczego nowej generacji [256].

Dodatkowy składnik proporcjonalny do entropii (CH) opisuje koszt uzyskania informacji zmniejszający zysk. Oryginalnie sformułowane pojęcie wartości informacji odnosi się do sytuacji, w których informacja przynosi zysk finan-

sowy. Koszt zwiększenia informacji wynika z kosztu środków technicznych koniecznych do realizacji tego celu.

W odniesieniu do przekazywania informacji człowiekowi ze zautomatyzowanego systemu należy przyjąć założenie, że zmiany z zakresu strumienia informacji od strony nadawczej są kwestią doboru algorytmu realizowanego w interfejsach informacyjnych. Istotnym zagadnieniem jest natomiast to, jak sposób przekazu jest odbierany przez człowieka, którego ze względu na selektywne działanie mechanizmu uwagi nie można traktować jako odbiornika o stałych parametrach.

Efekty występujące przy współpracy człowieka z systemem podczas realizacji zadań obejmują dodatkowo wpływ strumienia informacji (nie tylko zawartości, ale także całkowitego strumienia) na sposób działania. Podczas oceny zysku V należy brać pod uwagę wskaźnik jakości realizacji zadania. W zadaniach sterowania nadążnego oraz regulacji może to być np. wartość wskaźnika kwadratowego bądź maksymalna odchyłka od wartości zadanej, dla zadań polegających na reakcji na stan – np. czas reakcji i poprawność decyzji. Oczywiście jest zatem, że ze względu na różnorodność zadań sterowania dokładna definicja zysku musi być specyficzna dla każdego zadania.

Wracając do pojęcia kosztu w zagadnieniach dotyczących przekazywania informacji w układzie człowiek–maszyna, należy zaznaczyć, że koszty związane z przekazaniem informacji obejmują te czynniki, które obniżają zysk bezpośrednio bądź pośrednio.

Ważną właściwością ludzkiego umysłu jest zdolność dokonywania oceny. Subiektywne wskaźniki kosztu i zysku odgrywają istotną rolę w podejmowaniu decyzji. Dlatego rozważane są koncepcje wpływu czynnika, który można zapisać zależnością przyrostu wartości:

$$\Delta V = P(a_t) - L(\bar{a}_t) \quad (5.26)$$

gdzie: P – koszt działania wynikającego z wykorzystania informacji,
 L – strata wynikająca z braku działania [201].

W zakresie informacji dostarczanych człowiekowi zwiększenie strumienia informacji powoduje konieczność zwiększenia zaangażowania zasobów mentalnych do analizy, filtracji i selekcji informacji. Efektem bezpośrednim może być wydłużenie czasu reakcji oraz zmniejszenie dokładności odbioru wartości sygnałów istotnych w procesie sterowania, co skutkuje obniżeniem jakości sterowania. Efektem pośrednim jest zmniejszenie zasobów, jakie można wykorzystać do realizacji zadania sterowania. Może to nawet skutkować utratą możliwości realizacji części czynności wchodzących w skład złożonego zadania. W dłuższym czasie mogą wystąpić natomiast efekty przeciążenia i ogólny spadek sprawności człowieka operatora.

Zmniejszenie informacji poniżej poziomu niezbędnego do realizacji zadania niekoniecznie skutkuje bezpośrednim wpływem na jakość realizacji. Uaktywnienie mechanizmów odtwarzających brakujące informacje może kompensować braki, oczywiście kosztem zwiększenia obciążenia.

Zwiększenie strumienia informacji, jakie człowiek przekazuje urządzeniu (czyli sygnały sterujące), obejmuje wprowadzenie dodatkowych elementów sterowych oraz kształtowanie charakterystyk elementów, za pomocą których są wprowadzane sygnały sterujące. Konieczność obsługi wielu elementów sterowych jest oczywistym kosztem i w sytuacjach wymagających prawie równoczesnego wprowadzenia wielu sygnałów sterujących następuje znaczne zwiększenie obciążenia, zarówno mentalnego, jak i fizycznego. W zakresie kształtowania charakterystyk elementów sterowych kosztem jest wysiłek potrzebny do uzyskania określonej wartości sygnału zadawanego.

Uwzględniając wymienione właściwości, uzyskuje się następujące zależności opisujące wartość informacji (V_1 – określa wartość wprowadzenia informacji, V_2 – określa wartość informacji estymowanej, ΔV – to przyrost wartości wskaźnika będący subiektywną wartością informacji określaną, gdy istnieje możliwość estymacji):

$$V_1 = R_a - P_r - P_a - L_{\bar{a}} \quad (5.27)$$

$$V_2 = R'_a - P_e - P'_a - L_{\bar{a}} \quad (5.28)$$

$$\Delta V = R_a - R'_a - (P_r - P_e) - (P_a - P'_a) \quad (5.29)$$

gdzie: R_a – zysk wynikający z podjętego działania przy dostarczonej informacji,

P_a – koszt podjętego działania,

P_r – koszt odbioru informacji,

$L_{\bar{a}}$ – strata wynikająca z braku działania,

R'_a – zysk wynikający z podjętego działania przy estymacji informacji,

P'_a – koszt podjętego działania na podstawie estymowanej informacji,

P_e – koszt estymacji informacji.

Z zależności (5.29) wynika, że szumem, zgodnie z definicją 5.1, będzie informacja, dla której $\Delta V < 0$, jeśli istnieje możliwość estymacji. Oczywiście także informacja niedająca się estymować i skutkująca działaniem, jeśli jego efekt nie przekłada się na wzrost V_1 , jest wprost z definicji szumem.

Wskaźnik V_2 wiąże się z procesem podejmowania decyzji. Może opisywać (po zastąpieniu wartości kosztów, zysków i strat przez ich przewidywane wartości) jedno z kryteriów subiektywnej oceny efektów odtworzenia informacji poprzedzających decyzję, czy podejmować wysiłek estymacji i działania. Jeśli

natomiast proces estymacji jest bezwysiłkowy (wynik doświadczenia), to wartość informacji wynika z oceny skutków działania.

5.3.2. Informacja prezentowana przez system wskazań w zadaniu sterowania

Niech model obiektu sterowanego będzie opisany ogólnym równaniem nieliniowym (3.1), do którego dołączone zostało równanie:

$$y_p = h_p(y) \quad (5.30)$$

określające sygnały dodatkowe y_p , zawierające przetworzone wyniki pomiarów. Uzyskana informacja syntetyczna może spowodować, że człowiek szybciej i dokładniej odtwarza stan obiektu sterowanego. W równaniu (5.30) ta dodatkowa informacja jest pewną funkcją, ale możliwości z tego zakresu obejmują także wykorzystanie systemów dynamicznych, np. obserwatora i predyktora stanu [6, 117].

Podczas sterowania pewnym procesem dynamicznym, dla którego sygnał wyjściowy $y_i \in \{y\} \cup \{y_p\}$, zapewnione jest sprzężenie zwrotne. W przeciwnym wypadku sterowanie odbywa się w układzie otwartym.

Lokalne charakterystyki procesu dynamicznego (wzór (3.1)) dla małych odchyłeń od stanu ustalonego (x_0, u_0, z_0) opisuje równanie (3.4). Dla dwóch zmiennych wyjściowych przyjmuje ono postać:

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} u(s) \quad (5.31)$$

Model sterowania realizowanego przez człowieka, gdy zmienną kontrolowaną jest y_1 , a zmienna y_z określa pożądane wartości zmiennej kontrolowanej, niech będzie przedstawiony w postaci macierzy transmitancji:

$$u(s) = \begin{bmatrix} g_{r11}(s) & g_{r12}(s) & g_{r13}(s) \\ g_{r21}(s) & g_{r22}(s) & g_{r23}(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_z(s) \\ y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

Po przekształceniu zależności (5.31) i (5.32) model zastępczy układu sterowania, ze względu na wartość y_1 , jest opisany równaniem:

$$y_1(s) = \frac{(1 - a_{23}(s))a_{11}(s) + a_{13}(s)a_{21}(s)}{(1 - a_{12}(s))(1 - a_{23}(s)) - a_{13}(s)a_{22}(s)} y_z(s) \quad (5.33)$$

Składniki w transmitancji układu zamkniętego są określone zależnością:

$$a_{ij}(s) = \sum_{k=1}^l g_{ik}(s) g_{rkj}(s) \quad (5.34)$$

Jeśli zmienna y_2 zawiera informację o wartości pochodnej zmiennej y_1 , to wtedy $g_{2i}(s) = s g_{1i}(s) + \Delta_i(s)$, co implikuje:

$$a_{2i}(s) = s a_{1i}(s) + \varepsilon_i(s) \quad (5.35)$$

gdzie Δ_i jest składnikiem innych informacji, niezwiązanych z pochodną zmiennej y_1 , natomiast ε_i jest efektem niezerowej wartości czynnika Δ_i . Po przekształceniu zależności (5.33) z uwzględnieniem wzoru (5.35) nowa transmitancja układu ma postać:

$$y_1(s) = \frac{(1 - \varepsilon_3(s)) a_{11}(s) + a_{13}(s) \varepsilon_1(s)}{(1 - a_{12}(s))(1 - \varepsilon_3(s)) - (s + \varepsilon_2(s)) a_{13}(s)} y_z(s) \quad (5.36)$$

Czynniki ε_i wynikają z przyjęcia, że sygnał y_2 zawiera pewne zakłócenie bądź zniekształcenie poza składową będącą pochodną sygnału y_1 . Jeśli założyć się brak tego zniekształcenia, czyli $\varepsilon_i = 0$, oraz dodatkowo $a_{11}(s) = -a_{12}(s) + v(s)$, czyli a_{11} opisuje działanie regulatora, natomiast v – działanie wyprzedzające, to wtedy wynikowy model:

$$y_1(s) = \frac{-a_{12}(s) + v(s)}{(1 - a_{12}(s)) - s a_{13}(s)} y_z(s) \quad (5.37)$$

opisuje zmodyfikowany układ sterowania.

W układzie sterowania (5.37) pojawia się sprzężenie od pochodnej i przy odpowiedniej postaci transmitancji a_{13} przy regulatorze proporcjonalnym ($g_{r11}(s) = -g_{r12}(s) = k_r$) uzyskiwany jest efekt regulatora PD (proporcjonalno-różniczkującego), a to najczęściej skutkuje zwiększeniem tłumienia oscylacji własnych, poprawą tłumienia zakłóceń oraz umożliwia poszerzenie pasma. Oczywiście, aby prawidłowo ocenić możliwe efekty wynikające z wprowadzenia dodatkowego sygnału, należy przeanalizować właściwości człowieka.

Pierwszym ograniczeniem efektywności jest szybkość przetwarzania sygnałów przez człowieka. Gdy uwzględni się opóźnienia przetwarzania informacji (szacowane na ok. 0,2 s) oraz pogorszenie się jakości sterowania przy częstotliwościach poza pasmem optymalnym (np. prawo „jednej trzeciej” [177]), szybkozmenny sygnał pochodnej może być mylący dla operatora. Warto jednak

zauważyć, że jeśli dostosowanie się operatora polega na wprowadzeniu elementu wyprzedzającego, to jest to odpowiednik operacji różniczkowania. Pojawia się pytanie, jak człowiek realizuje tę operację. Jeśli na wskaźniku wielkości sterowanej występuje ruch wskazówki, tarczy bądź linii, to informacja o pochodnej może być związana z percepcją tego ruchu. Szybkość ruchu zależy od skali przyrządu prezentującego informację.

Ponieważ wprowadzenie dodatkowych informacji skutkuje zwiększeniem obciążenia kanału informacyjnego, to wykorzystanie dodatkowego wskaźnika, zwłaszcza umieszczonego w takiej odległości od wskaźnika wielkości podstawowej, że konieczne jest przenoszenie wzroku, wprowadza dodatkowe opóźnienie i skutkuje sekwencyjną analizą obrazów. Wytrenowanie pilotów w obserwacji przyrządów [46, 324, 325, 328] może kompensować opisany efekt.

Należy się spodziewać, że takie zbliżenie wskaźników, aby znalazły się równocześnie w polu widzenia, może uprościć procesy przetwarzania informacji, zwłaszcza gdy zastosowany sposób prezentacji będzie intuicyjny. Technologia wskaźników zintegrowanych, na których obraz jest generowany komputerowo, daje możliwość uzyskania wspomnianych właściwości.

5.4. Kształtowanie charakterystyki sterownicy

5.4.1. Sterownica w procesie sterowania

Sterownica przekazuje sygnał sterujący do systemu. Reakcja sterownicy stanowiąca sprzężenie zwrotne na wymuszenie jest odbierana przez proprioreceptory (głównie jako siła, ale także jako przemieszczenie). W sterownicach aktywnych istnieje możliwość celowego wpływu na sygnał siły sprzężenia zwrotnego przez odpowiednie siłowniki. Siła reakcji sterownicy pasywnej wynika z charakterystyki zastosowanych elementów pasywnych – głównie sprężystych, tłumiących i powodujących inne formy siły oporu. Sterownice pasywne, w zależności od rodzaju sygnału wyjściowego i zakresu ruchu, można podzielić na [315]:

- izotoniczne, siłowe – sygnał wyjściowy jest uzależniony od wychylenia, a siła reakcji przy wychylaniu jest niewielka,
- izometryczne, pozycyjne – sygnał wyjściowy zależy od siły, a zakres ruchu jest niewielki,
- elastyczne, ze sprężynami powrotnymi (*spring loaded, elastic*) – sygnał wyjściowy zależy od wychylenia podobnie jak siła reakcji.

Sygnał wyjściowy ze sterownicy jest przekazywany na wejście systemu sterowania, natomiast człowiek przez zmysły odbiera reakcję sterownicy. Dla sterownicy izometrycznej reakcja sterownicy i sygnał zadawany są tożsame, a zatem sygnał zwrotny informuje o poziomieysterowania. Ten rodzaj interfejsu sterującego jest preferowany przy sterowaniu prędkościowym.

W przypadku sterownicy izotonicznej sygnał zwrotny jest odbierany przez proprioreceptory. Z właściwości człowieka wynika, że tego rodzaju urządzenia dobrze sprawdzają się podczas wykonywania czynności precyzyjnych, zwłaszcza połączonych z kontrolą wizualną. Problemem jest jednak wysiłek statyczny wymagany do utrzymania określonej pozycji.

Do najczęściej stosowanych należą sterownice zawierające elementy wytwarzające siłę zależną od położenia (czyli elementy sprężyste). Często kształtuje się je w taki sposób, aby położenie neutralne było wyróżnione przez skokową charakterystykę zależności siły od wychylenia. Tego rodzaju element ma charakterystykę pośrednią pomiędzy dwiema pozostałymi. Kształtując charakterystykę sztywności oraz sposób przetwarzania sygnału ze sterownicy, można uzyskać różne właściwości systemu.

5.4.2. Dopasowanie charakterystyki statycznej sterownicy

Charakterystyka statyczna sterownicy opisuje, jak sygnał u przekazywany przez sterownicę do systemu sterowania zależy od wychylenia sterownicy δ (sterownice izotoniczne i sprężyste):

$$u = f(\delta) \quad (5.38)$$

Funkcja ta może być w szczególności liniowa, lecz stosuje się także funkcje nieliniowe [234].

Niech zakres ruchu sterownicy w dalszych rozważaniach będzie przedziałem $(-1, 1)$. Przy założeniu jednakowej w całym przedziale rozróżnialności stanów sterownicy na poziomie $\Delta\delta$, informacja, jaką można przekazać przez sterownicę, jest określona liczbą rozróżnialnych stanów:

$$H = \log_2 \frac{2}{\Delta\delta} \quad (5.39)$$

Jeśli w procesie sterowania wykorzystywany sygnał jest określony rozkładem $p_i = p(\delta_i)$, o właściwościach⁷:

$$\left. \begin{array}{l} \sum p_i = 1 \\ n = \left[\frac{2}{\Delta\delta} \right] \end{array} \right\} \quad (5.40)$$

to informację przekazywaną podczas sterowania określa równanie:

⁷ [] – oznaczenie wartości całkowitej liczby.

$$H_p = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (5.41)$$

Jeśli rozróżnialność spełnia prawo Webera oraz w pobliżu zerowego sygnału próg detekcji wynosi $\Delta\delta_0$, to liczbę rozróżnialnych poziomów określa zależność:

$$n = 1 + \frac{\ln \frac{\delta_n}{\Delta\delta_0} (2-w)}{\ln \frac{2+w}{2-w}} \quad (5.42)$$

gdzie w jest zdefiniowane wzorem (5.13).

Niech struktura układu sterowania składa się ze sterownicy, dynamicznego procesu sterowanego oraz układu pomiarowego wielkości sterowanej wraz ze wskaźnikiem tej wielkości. Informacja zwrotna o efektach sterowania może być także odbierana bezpośrednio przez zmysły.

Rozdzielczość, z jaką jest odbierana informacja zwrotna Δy_k oraz rozkład zmiennej sygnału wyjściowego $p_y(k)$ określają entropię $H_y(p_y)$. Podobnie dla sygnału sterującego można określić entropię $H_u(p_u)$.

Definicja 5.2

Kompatybilność informacyjna interfejsów informacyjnych i sterujących w danym zadaniu sterowania scharakteryzowanym przez rozkłady p_u i p_y zachodzi wtedy, gdy $H_u(p_u) \approx H_y(p_y)$.

Twierdzenie 5.2

Interfejsy cechujące się kompatybilnością informacyjną pozwalają na uzyskanie najwyższej jakości sterowania przy najmniejszym obciążeniu człowieka realizacją zadania.

Analiza

Jeśli nie zachodzi kompatybilność informacyjna, to mogą wystąpić dwa przypadki:

- $H_u(p_u) \gg H_y(p_y)$ – czyli dla małych zmian wartości sterującej nie są obserwowalne efekty w sygnale wyjściowym,
- $H_u(p_u) \ll H_y(p_y)$ – czyli w sygnale wyjściowym istnieją stany, których osiągnięcie wymaga wysterowania z wyższą rozdzielczością niż dostępna.

Drugi przypadek wymaga komentarza. Rozdzielczość przy wychylaniu sterownicy odpowiada rozróżnialności kolejnych pozycji, a zatem pozycje pośrednie są osiągalne, lecz wiąże się to ze zwiększeniem wysiłku przy sterowaniu. Co do rozdzielczości pomiaru wychylenia należy przyjąć założenie, że jest ona odpowiednia dla zadania i nie ma wpływu na rozpatrywane zagadnienia.

Rozdzielczość odbioru informacji zwrotnej może wynikać z wartości wskazywanej bądź z intensywności pobudzenia. W pierwszym przypadku, przy liniowej skali analogowego przyrządu wskazującego rozdzielczość jest stała w całym zakresie. Odbiór informacji jako intensywności bodźca występuje wtedy, gdy sygnał jest odbierany przez zmysły (siła reakcji, intensywność oświetlenia itd.), ale także wtedy, gdy wartość zmiennej wynika ze zmian wartości wychylenia na przyrządzie analogowym bądź szybkości ruchu obrazu. Dla tego typu odbioru informacji z prawa Webera wynika zmienna rozdzielczość proporcjonalna do intensywności bodźca.

Przy sterowaniu pozycyjnym wartości uzyskiwane w stanach ustalonych są określone wychyleniem sterownicy. Jeśli wykorzystywane są wskazania analogowe i sterownica pozycyjna, to kompatybilność informacyjna występuje wtedy, gdy zostaną odpowiednio dobrane zakresy ruchu elementu zadającego i wielkość wskaźnika.

Sterowanie prędkościowe oznacza, że wychylenia sterownicy wywołują zmiany wielkości sterowanej. Stąd informacją zwrotną jest nie tyle wartość sterowana y , co jej pochodna \dot{y} . Zgodnie z przeprowadzoną analizą charakterystyka sterownicy ruchomej o niewielkiej sile reakcji zapewniająca kompatybilność informacyjną powinna być nieliniowa. Dla sterownicy o dużej sile reakcji istotne jest, czy podczas sterowania percepcja sygnału sterującego wynika z wychylenia, czy z siły. W skrajnym przypadku dla sterownicy nieruchomej (lub o nieznacznym zakresie ruchu) z wyjściowym sygnałem proporcjonalnym do siły (sterownica izometryczna) podobne kształty charakterystyk oznaczają, że kompatybilność informacyjna będzie z zasady zapewniona.

Przykład kształtowania charakterystyki sterownicy

Dla sterownicy pozycyjnej rozdzielczość sygnału $\Delta\delta$ jest stała w całym zakresie. Sygnał zwrotny jest odbierany na podstawie ruchu obrazu wskaźnika. Rozdzielczość wynikająca z właściwości percepcji dla sygnału v jest określona przez:

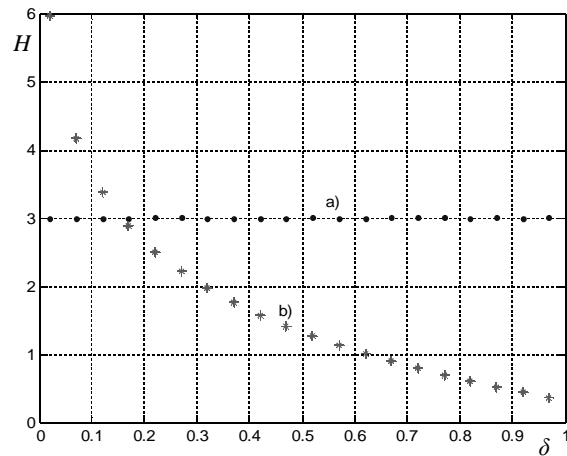
- Δv_0 – próg detekcji w pobliżu zerowego sygnału,
- $\Delta v_k = W \cdot v_k$ – rozróżnialność dla v_k .

Aby to zobrazować, zakres zostanie podzielony na 20 przedziałów o stałej długości. Na rysunku 5.4 przedstawiono wartości entropii informacji w poszczególnych przedziałach. Widoczny jest niedobór informacji dla małych wartości i nadmiar dla dużych.

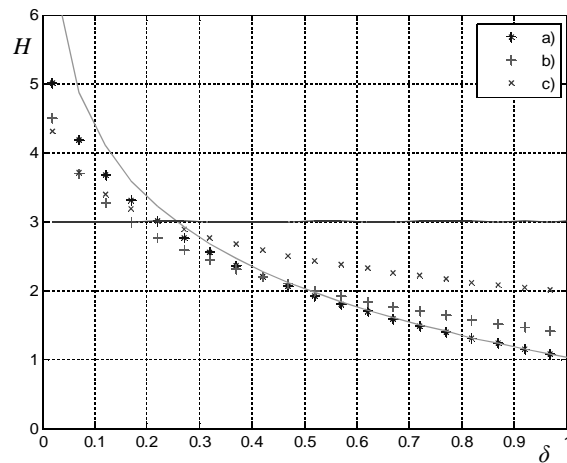
Kształtując charakterystykę sterownicy (5.38) przez funkcje:

- $f(x) = a \cdot \log\left(\frac{x}{b} + 1\right)$ (a, b – współczynniki),
- $f(x) = x^3$,
- $f(x) = x^2$,

uzyskuje się zmianę rozkładu informacji skutkującą zmianami entropii. Na rysunku 5.5 przedstawiono charakterystyki po wprowadzeniu funkcji kształtujących, które powodują poprawienie kompatybilności charakterystyki sterownicy względem sygnału zwrotnego.



Rys. 5.4. Entropia informacji w przedziałach: a) dla sygnału z podziałem równomiernym, b) dla sygnału spełniającego prawo Webera



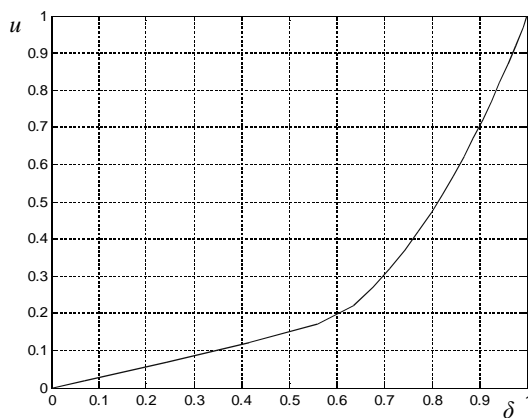
Rys. 5.5. Entropia informacji po ukształtowaniu charakterystyki (a, b, c – zgodnie z oznaczeniem funkcji w tekście)

Charakterystyka sterownicy w systemie pośredniego sterowania samolotu

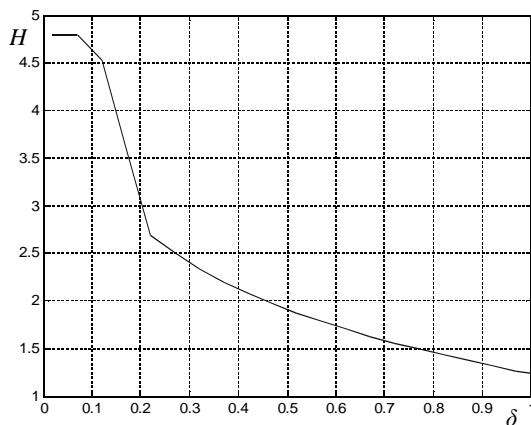
Analizując sterowanie samolotem, należy uwzględnić różnice w sterowaniu w ruchu symetrycznym (ster wysokości) i niesymetrycznym (lotkami). W tym pierwszym sterowanie ma charakter pozycyjny dla małych wychyleń i prędkościowy dla większych. W drugim jest to sterowanie prędkościowe w całym zakresie. W przypadku sterowania w ruchu niesymetrycznym znaczące siły na sterownicy powinny więc umożliwić uzyskanie kompatybilności informacyjnej.

Występujące dwie strefy w charakterze sterowania sterem wysokości sugerują, że:

- dla zakresu odpowiadającego operacyjnym stanom ustalonym wychylenia sterownicy określają stan ustalony i korzystne jest, aby działanie sterownicy miało charakter pozycyjny,
- dla wychyleń poza przedziałem stanów ustalonych korzystne jest, aby charakterystyka miała postać jak dla sterowania prędkościowego.



Rys. 5.6. Proponowana charakterystyka sterownicy dla ruchu symetrycznego



Rys. 5.7. Entropia dla sygnału sterującego dla funkcji kształtującej jak na rys. 5.6

Charakterystyka spełniająca te warunki, z uwzględnieniem przeprowadzonej uprzednio analizy funkcji kształtujących, została przedstawiona na rys. 5.6. Charakterystyka w części liniowej powoduje, że sterownica przekazuje znaczną część informacji, pozwalając na dokładne ustalanie wartości zadawanej (rys. 5.7).

5.4.3. Badanie charakterystyki sterownicy przy sterowaniu systemem obserwacyjnym

Aby zilustrować efekty wynikające z kształtu charakterystyki sterownicy i zasady kompatybilności informacyjnej, wykonano eksperyment, który polegał na sterowaniu orientacją głowicy obserwacyjnej przez operatora realizującego proces obserwacji. Zadanie to zostało wybrane ze względu na stacjonarne charakterystyki obiektu sterowanego. Model samolotu zmienia charakter zachowania w zależności od warunków lotu (rys. C4, C5, dodatek C). Podczas sterowania pilot wykorzystuje równocześnie kilka sygnałów sterujących, konieczne jest także kontrolowanie wielu zmiennych stanu. Efekty sterowania zależą więc od przyjętej taktyki działania człowieka i typowych umiejętności pilotażowych.

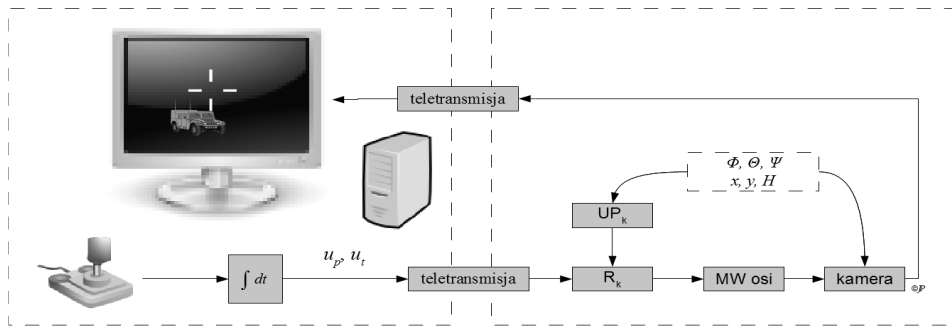
W program badań włączono także modyfikację charakterystyki interfejsu informacyjnego. Dodatkowy element, pokazujący kierunek i prędkość ruchu, jest obrazem sygnału pochodnej. Celem badania jest weryfikacja zasady kompatybilności informacyjnej oraz sprawdzenie, jak informacja o pochodnej wpływa na realizację sterowania. Badane są jakość sterowania oraz poziom obciążenia zadaniowego.

Realizacja zadania obserwacyjnego wiąże się najczęściej ze sterowaniem orientacją kamery umieszczonej w ruchomej, stabilizowanej przez sterowniki głowicy obserwacyjnej. Na rysunku 5.8 zobrazowano przykładową konfigurację systemu obserwacyjnego składającego się:

- ze sterownicy dwuosiowej,
- z komputera SKL z monitorem zobrazowania,
- z układów teletransmisji sygnałów sterujących i obrazu,
- z głowicy obserwacyjnej, zawierającej:
 - kamerę,
 - mechanizmy wykonawcze (MW) realizujące obroty względem osi odchylania (*pan*) i pochylania (*tilt*),
 - regulator głowicy kamery (R_k),
 - układy pomiarowe (UP_k).

Wykorzystując głowicę obserwacyjną o dwóch stopniach swobody, przeprowadzono badanie wpływu charakterystyk interfejsów na działanie operatora. Testom poddano dwa elementy:

- charakterystykę statyczną sterownicy,
- efekt wprowadzenia dodatkowej informacji.



Rys. 5.8. Struktura systemu obserwacyjnego sterowanego przez operatora SKL dla samolotu bezzałogowego

Program eksperymentu był następujący:

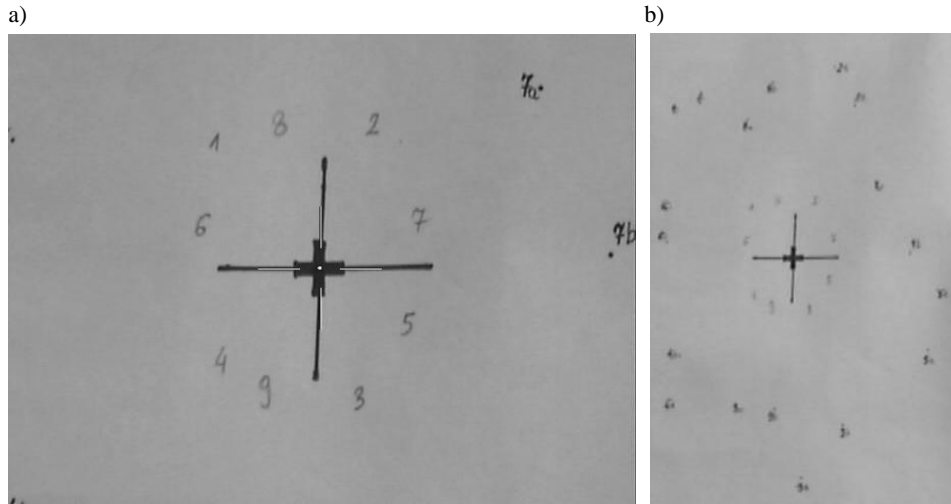
- 1) zapoznanie się uczestnika z zadaniem przez realizację sterowania niepodlegającą ocenie,
- 2) wykonanie pierwszego testu, podczas którego są rejestrowane podstawowe zmienne stanu i sygnały sterujące,
- 3) przeprowadzenie ankiety NASA-TLX,
- 4) powtórzenie etapów 2. i 3. dla innych konfiguracji,
- 5) uzyskanie komentarza dotyczącego oceny poszczególnych konfiguracji.

W ramach testów porównano sterownicę o charakterystyce zgodnej z teorią kompatybilności informacyjnej K ze sterownicą o charakterystyce liniowej L. Wprowadzony dodatkowy element informacyjny pokazywał na ekranie w formie graficznej aktualną prędkość obracającej się głowicy (wyniki z tym elementem oznaczono symbolem I).

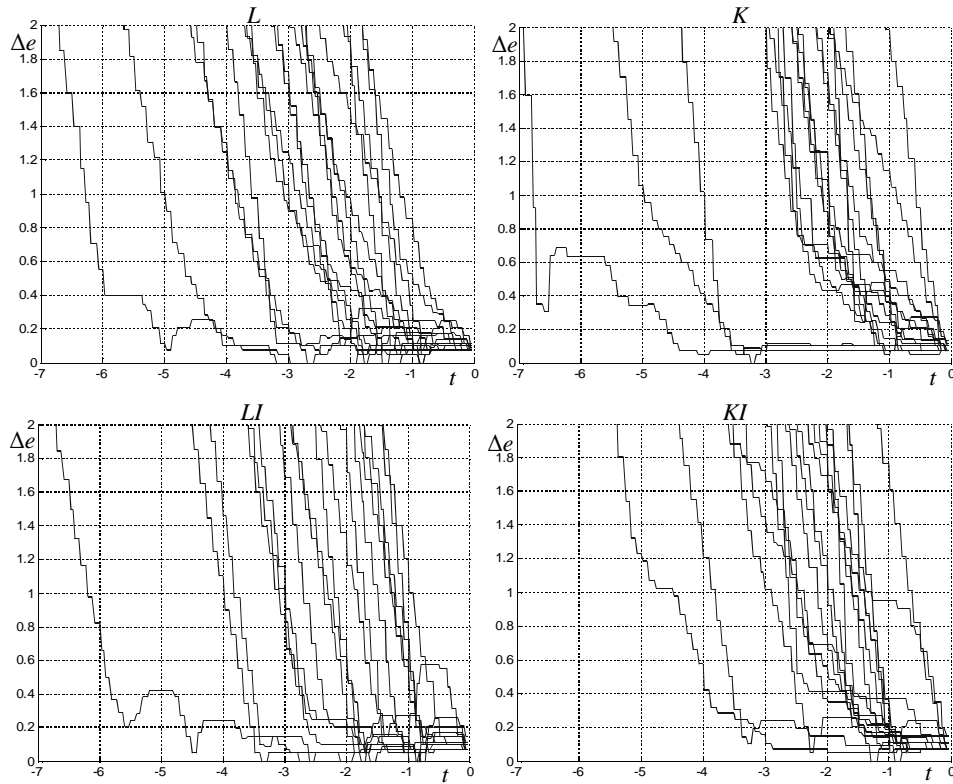
Zadanie polegało na takim sterowaniu, aby kolejno nakierować głowicę na cele oznaczone symbolami 1a, 1b, następnie powrócić na cel oznaczony krzyżem, po czym kolejno na cele oznaczone liczbami od 2 do 9 i z powrotem na cel centralny (na rys. 5.9a widoczne punkty 7a, 7b i pozostałe w dalszej odległości). W polu centralnym umieszczono wartości liczbowe pokazujące przybliżony kierunek, w którym znajdują się kolejne punkty. Ten element informacyjny został zastosowany, aby wyeliminować konieczność poszukiwania celu, który nie jest widoczny na obrazie w położeniu centralnym (rys. 5.9b). Po osiągnięciu każdego punktu uczestnik miał zatrzymać kamerę, dzięki czemu zyskiwał czas na przygotowanie się do kolejnego zadania. Ten sposób działania na etapie analizy wartości ułatwia identyfikację charakterystycznych orientacji kamery.

Wyniki testów zostały zaprezentowane w formie wykresów czasowych odległości od celu (rys. 5.10):

$$\Delta e_k = \sqrt{\Delta \alpha_{1k}^2 + \Delta \alpha_{2k}^2} \quad (5.43)$$



Rys. 5.9. Widok planszy wykorzystywanej w eksperymentach; opis oznaczeń w tekście



Rys. 5.10. Przebiegi zmian odległości od celu w funkcji czasu (podanego jako kąt) uzyskane podczas eksperymentu dla różnych charakterystyk układu; opis oznaczeń w tekście

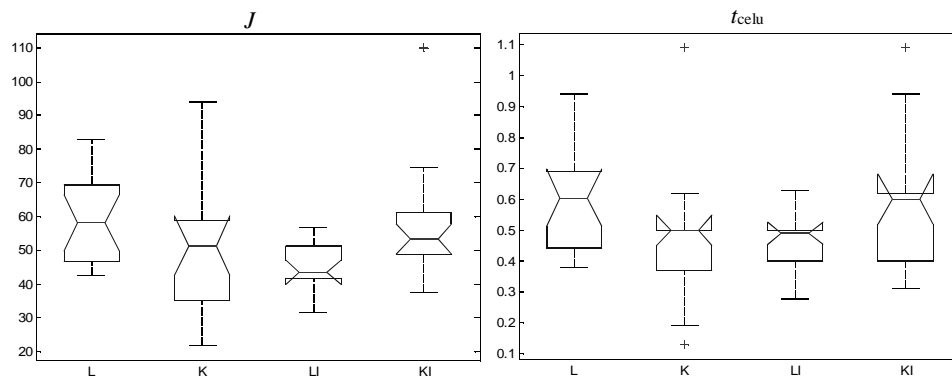
Chwila $t = 0$ oznacza osiągnięcie celu z założoną dokładnością. Dla każdego przebiegu zmiany położenia do punktu i został obliczony wskaźnik jakości, zgodnie z zależnością:

$$J_i = \sqrt{\sum_{k \in f_i} \Delta e_k^2} \quad (5.44)$$

Zbiór indeksów f_i wynika z przyjętych granic przedziału uznanego za końcową fazę sterowania: dolną, wynikającą z dopuszczalnego błędu i górną, dobraną arbitralnie. Drugi wskaźnik to czas, po którym odchylenie zmniejsza się od 2° do 1° , czyli opisuje szybkość w końcowej fazie sterowania.

Analiza przebiegów przejściowych wskazuje na zmianę sposobu sterowania, gdy sterownica ma charakterystykę spełniającą warunek kompatybilności informacyjnej. W końcowej fazie następuje zmniejszenie szybkości ruchu. Efekt ten jest największy, gdy porówna się charakterystyki K i L (rys. 5.10).

Po wprowadzeniu elementu informacyjnego interpretacja samych przebiegów nie jest już tak oczywista. Dopiero zaprezentowane rozkłady wskaźników widoczne na rys. 5.11 obrazują pewne różnice. Jednoznaczne stwierdzenie poprawy wynikającej z zastosowanych rozwiązań jest możliwe przez porównanie estymat wartości oczekiwanych rozkładów. Okazuje się, że jedynie przy porównaniu rozwiązań L i LI analiza wariancji (ANOVA) wykazuje istotne różnice (na poziomie istotności 0,0077 i 0,0009).



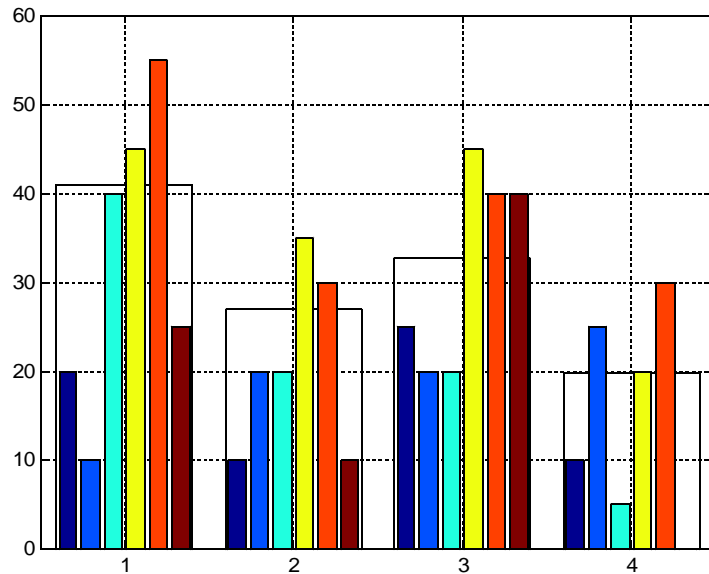
Rys. 5.11. Rozkłady⁸ wskaźnika jakości i czasu osiągnięcia kierunku celu wyliczone dla serii procesów sterowania w różnych konfiguracjach

Porównanie wartości wskaźników prowadzi do wniosku, że wprowadzenie dodatkowego elementu informacyjnego ma całkowicie odmienny wpływ na

⁸ Parametry rozkładów są widoczne jako: wartość oczekiwana – linia środkowa, 25 i 75 percentyl – linie górna i dolna wieloboku, graniczny przedział ufności – linie skrajne. Punkty poza granicznym przedziałem ufności są oznaczane znakiem +.

sterowanie w zależności od charakterystyki sterownicy. W przypadku sterownicy o charakterystyce K trudno stwierdzić jakiś pozytywny wpływ.

Ocena dokonana przez osoby sterujące podczas testów wyraźnie wskazuje, że charakterystyka K jest korzystniejsza, a wprowadzenie elementu informacyjnego ułatwia sterowanie. Wszystkie zaprezentowane wyniki i opinie zostały skonfrontowane z oceną TLX przedstawioną na rys. 5.12. Okazało się, że obydwa badane rozwiązania redukują obciążenie (jest to także widoczne w poszczególnych składnikach) podczas realizacji zadania, a łącznie następuje wzmocnienie efektu.

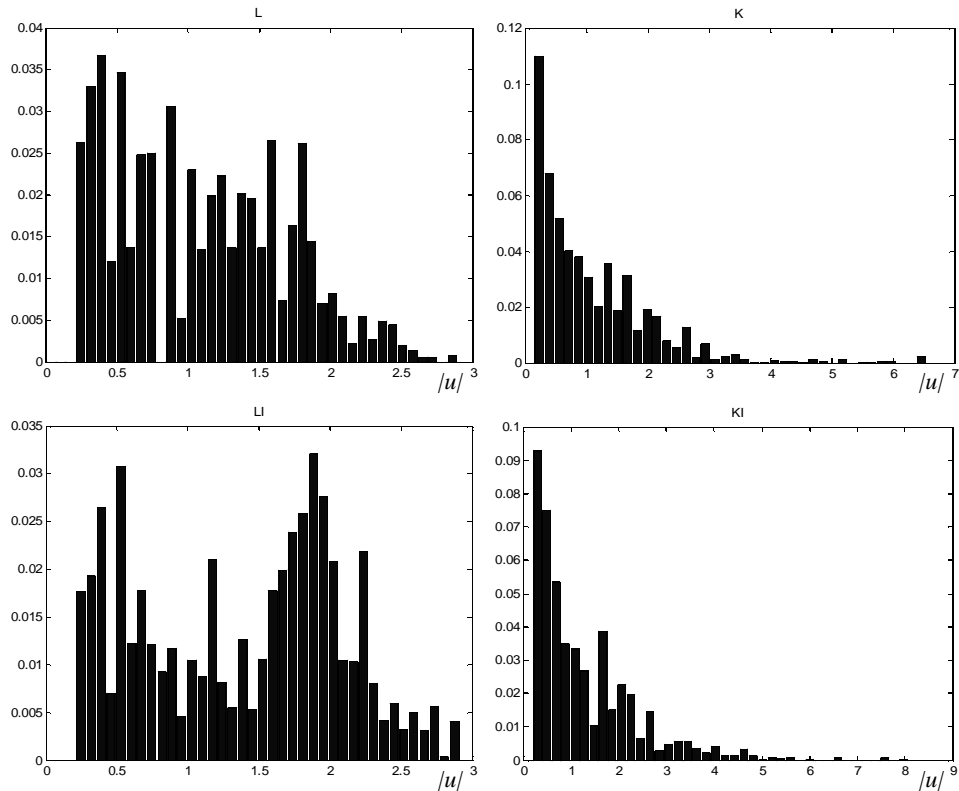


Rys. 5.12. Wyniki ankiety NASA-TLX (1 – L, 2 – K, 3 – LI, 4 – KI); wynik końcowy oraz wyniki cząstkowe w kolejności: zaangażowanie fizyczne, zaangażowanie umysłowe, presja czasu, wysiłek, wydajność, frustracja

Mimo potwierdzenia spodziewanego zmniejszenia poziomu obciążenia zarówno dostarczenie dodatkowej informacji, jak i zapewnienie kompatybilności informacyjnej nie pomogły rozstrzygnąć, w jaki sposób zmienia się sposób działania człowieka. Podczas realizacji eksperymentów zarejestrowano wartości sygnałów sterujących, a na etapie analizy wykonano histogramy wartości amplitudy sygnału sterującego, wyliczonego zgodnie z zależnością:

$$|u_i| = \sqrt{(u_{pi}^2 + u_{ii}^2)} \quad (5.45)$$

w której u_p i u_t są wartościami zadawanymi odpowiednio w osiach odchylenia i pochylania. Z założonego podczas eksperymentu planu działania wynika, że przez większość czasu sygnał sterujący był zerowy. W zaprezentowanych na rys. 5.13 histogramach unormowanych wartość dla sygnału w pobliżu zera została usunięta.



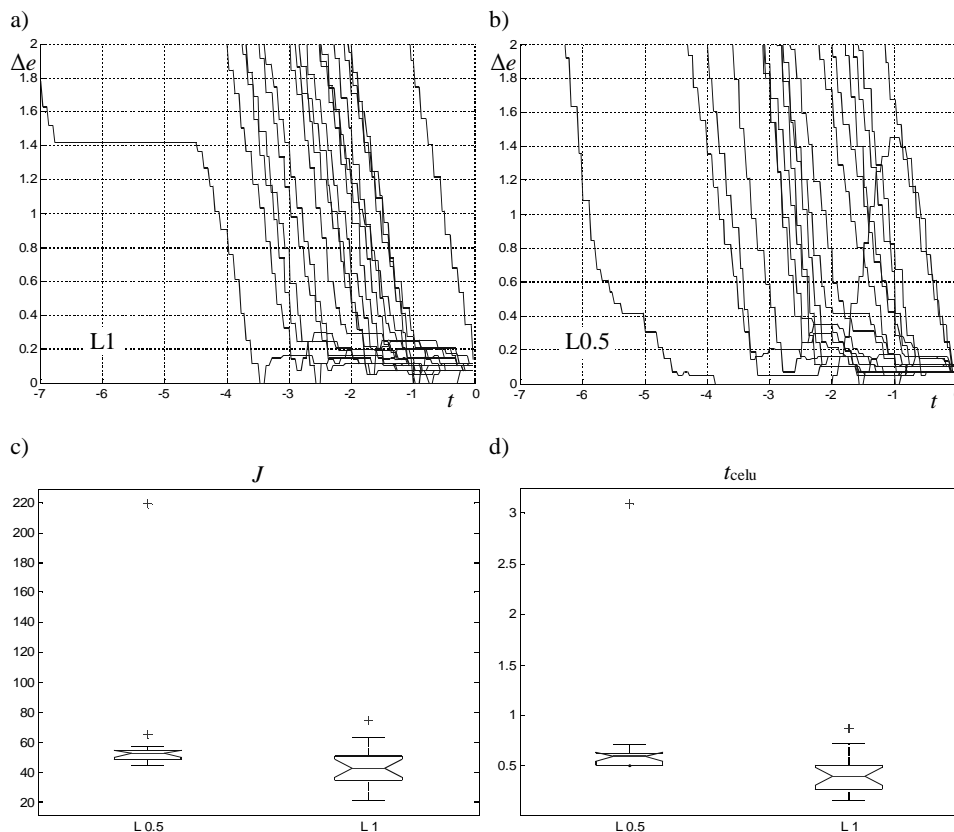
Rys. 5.13. Histogramy sygnałów sterujących dla badanych konfiguracji

Charakter histogramu dla charakterystyki L świadczy o problemach z doborem właściwej wartości sygnału sterującego. Zapewnienie kompatybilności informacyjnej (charakterystyka K oraz KI) powoduje, że działania człowieka stają się zbliżone do działania typowego regulatora.

Wpływ wprowadzenia elementu informacyjnego jest różny, w zależności od charakterystyki sterownicy. Rozkład widoczny na histogramie dla charakterystyki LI świadczy o zmianie sposobu działania człowieka operatora po wprowadzeniu elementu informacyjnego. Częstsze wykorzystanie większych wartości sygnału sterującego jest charakterystyczne dla sterowania ze zmianą trybów. Wynika stąd wniosek, że dodatkowa informacja umożliwia lepsze przewidywanie stanu, a przez to pozwala szybciej naprowadzić na cel.

Dodatkowa informacja ma także korzystny wpływ na charakterystykę K , obniżając obciążenie. Dokładniejsze porównanie histogramów pokazuje częstsze wykorzystanie sygnałów o wyższych wartościach, co świadczy o zwiększeniu wzmocnienia regulatora. W tym jednak rozwiązaniu nie następuje zmiana charakteru działania.

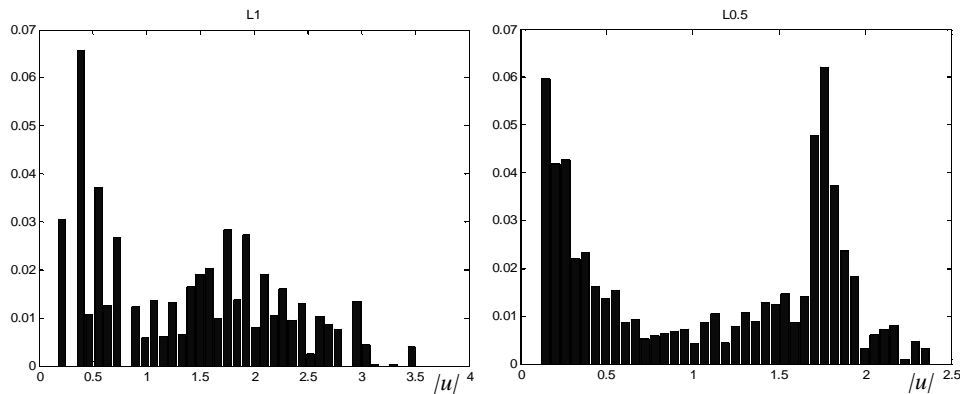
W drugiej serii testów porównano sposób działania operatora dla dwóch wzmocnień: oznaczonego 1 (ta wartość była ustawiona także w pierwszej serii testów) oraz 0,5. Obydwa testy wykonano przy załączonym elemencie informacyjnym. Wyniki zostały zaprezentowane w formie przebiegów czasowych odległości od celu (rys. 5.14a, b) oraz wartości wskaźnika (rys. 5.14c) opisanego wzorem (5.44) i czasu zmiany odchylenia od 2° do 1° (rys. 5.14d).



Rys. 5.14. Przebiegi zmian odległości od celu w zależności od wzmocnienia (a, b) oraz rozkłady wskaźnika jakości (c) i czasu osiągnięcia kierunku celu (d)

Rozkłady wartości wskaźnika jakości i czasu osiągnięcia celu świadczą o tym, że zmniejszenie wzmocnienia powoduje zmniejszenie różnic pomiędzy

procesami przejściowymi. Przyczyna tego efektu staje się widoczna w histogramach sygnału sterującego (rys. 5.15). Ekstremum sygnału sterującego odpowiada wartościom zbliżonym do maksymalnych wychyleń sterownicy. Z komentarza osoby realizującej sterowanie wynika, że naprowadzanie na kolejne punkty w początkowej fazie było realizowane z maksymalnymi wychyleniami. Podobieństwo przebiegu początkowego oznacza możliwość wyuczenia sposobu reakcji w fazie końcowej (czyli sprowadzenie działania do poziomu SBB) i ten efekt jest wytłumaczeniem zmniejszenia szerokości rozkładów.



Rys. 5.15. Histogramy sygnałów sterujących dla różnych współczynników wzmocnienia

Porównując rozkłady z rys. 5.13 – L1 oraz z rys. 5.15 – L1 z L0,5, można wysunąć hipotezę, że drugie maksimum jest związane z właściwościami psychofizycznymi człowieka. Zwiększenie prędkości skutkuje prawdopodobnie problemami z prawidłową percepcją ruchu obrazu, stąd większa szerokość rozkładów.

5.5. Modyfikacje charakterystyk sygnałów przez filtry

5.5.1. Wpływ filtracji na przekaz informacji

Filtracja informacji zmienia zawartość informacyjną przesyłaną kanałem informacyjnym [253]. W dalszych rozważaniach zostanie przyjęte, że kanałem informacyjnym przesyłane są informacje analogowe, a sygnał jest przesyłany procesem stochastycznym. Niech $p_x(x, t)$ będzie rozkładem prawdopodobieństwa procesu stochastycznego $x(t)$ w chwili t . Dla procesów stacjonarnych $p_x(x, t) = p_x(x)$.

Niech $G(s)$ będzie transmitancją filtru. Charakterystykę częstotliwościową filtru opisuje funkcja zespolona $\hat{G}(j\omega)$ lub $\hat{G}(f)$:

$$\hat{G}(j\omega) = G(s)_{s=j\omega} \quad (5.46)$$

Rozkład prawdopodobieństwa sygnału wyjściowego y z filtra liniowego dla wejściowego sygnału x o wartości oczekiwanej \bar{x} i wariancji σ_x , charakteryzującego się widmem mocy $S_x(\omega)$ będzie miał następujące parametry:

- wartość oczekiwana

$$\bar{y}(t) = \int_0^t g(\tau) \bar{x}(t-\tau) d\tau = h(t) \cdot \bar{x} \quad (5.47)$$

- wariancja

$$\sigma_y^2 = \int_0^\infty |G(j\omega)|^2 S_x(\omega) d\omega \quad (5.48)$$

Zależność (5.47) wynika ze splotu sygnału i charakterystyki impulsowej elementu $g(t)$ ($h(t)$ jest charakterystyką skokową), natomiast zależność (5.48) wynika z teorii Parsewala.

Celem zilustrowania możliwości zmiany zawartości informacyjnej sygnału zostaną porównane dwa filtry:

- element o charakterystyce

$$G_{HP}(s) = 1 + a \cdot s \quad (5.49)$$

wykorzystywany do przyspieszania reakcji (np. w wyświetlaczach przyspieszonych lub w organach sterowych),

- element o charakterystyce

$$G_{LP}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (5.50)$$

będący prostym filtrem dolnoprzepustowym.

Po podstawieniu charakterystyk filtrów (5.49) i (5.50) do zależności (5.47) i (5.48) otrzymuje się informacje o właściwościach sygnałów wyjściowych.

Element (5.49) zwiększa wariancję, czyli $\sigma_y^2 > \sigma_x^2$, przez zwiększenie mocy sygnału dla wyższych częstotliwości. Wartość w stanach ustalonych, odpowiadająca wartości oczekiwanej po przejściu przez filtr, się nie zmienia. Dla filtra dolnoprzepustowego (5.50) wariancja zostaje zmniejszona, $\sigma_y^2 < \sigma_x^2$, przez zmniejszenie widma mocy w zakresie wyższych częstotliwości, a wartość oczekiwana w stanie ustalonym się nie zmienia.

Zmiana entropii sygnału dla $S_x(\omega) = S_x$ na podstawie wzoru (5.24) jest opisana zależnością:

$$H'(y) = H(y) + \frac{1}{W} \log \int_w |G(f)|^2 df \quad (5.51)$$

Entropia sygnału y zmienia się w stosunku $\alpha = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2}$, stąd element (5.49)

zwiększa entropię, natomiast filtr o charakterystyce (5.50) – zmniejsza.

Podczas analizy wpływu filtru istotna jest modyfikacja każdego ze składników sygnału. Dla elementu przyspieszającego (wzór (5.49)) należy rozważyć dwie sytuacje:

- wzmocnienie wysokich częstotliwości doprowadza do zwiększenia szumu: $N' = N + \Delta N$,
- wzmocnienie wysokich częstotliwości doprowadza do zwiększenia sygnału użytecznego: $P' = P + \Delta P$.

Wzmocnienie szumu może skutkować niepotrzebnymi działaniami oraz koniecznością dodatkowej filtracji. Obydwa czynniki świadczą o obniżeniu wartości informacji (wzór (5.27)). Wzmocnienie sygnału użytecznego powoduje poprawę jakości realizacji zadania, zwiększając zysk R_a . Wpływ na koszty, wynikający z wprowadzenia dodatkowej informacji nie jest tak jednoznaczny, gdyż przejawia się w zwiększeniu kosztu działania (P_a). Jeśli jednak informacja była estymowana, to wartość ($P_a - P'_a$) może pozostać stała, a redukcja kosztu uzyskania informacji ($P_r - P_e$) zwiększa wartość (wzór (5.29)).

Dla elementu filtru dolnoprzepustowego należy rozważyć dwie sytuacje:

- tłumienie wysokich częstotliwości doprowadza do redukcji szumu: $N' = N - \Delta N$,
- tłumienie wysokich częstotliwości doprowadza do zmniejszenia sygnału użytecznego $P' = P - \Delta P$.

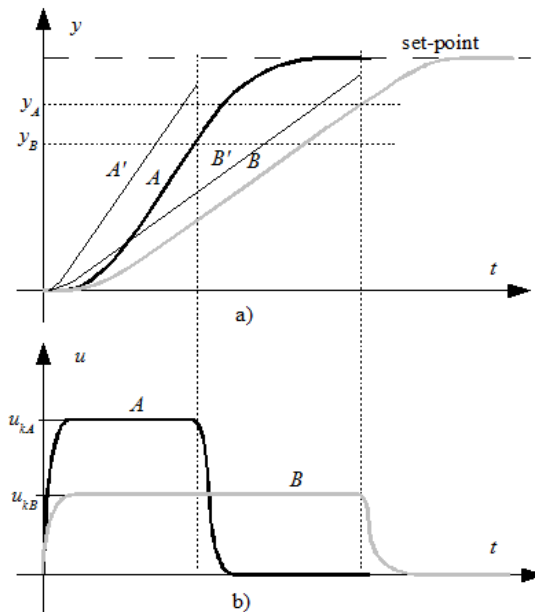
Tłumienie szumu poprawia jakość sygnału, równocześnie zmniejszając obciążenie przetwarzaniem informacji. Jest to więc efekt bardzo korzystny, który zmniejsza koszty odbioru (P_r) bądź koszty niepotrzebnych działań (P_a). Tłumienie sygnału użytecznego może wywołać uaktywnienie procesu estymacji lub redukcję działań. Subiektywna ocena wartości ΔV (wzór (5.29)) decyduje o podjęciu decyzji co do taktyki działania.

5.5.2. Wskaźnik przyspieszony

Wskaźnik przyspieszony (*quickened*) [27, 224] jest rozwiązaniem polegającym na prezentacji wartości będącej sumą sygnału właściwego i pochodnej tego sygnału, jak w zależności (5.49). Wprowadzenie modyfikacji (5.49) wartości

sterowanej powoduje zmianę wartości wskazywanej w sposób przedstawiony na rys. 5.16. Przeprowadzony eksperyment symulacyjny polegał na sterowaniu z wykorzystaniem sygnałów zmieniających się w założony sposób pomiędzy wartościami 0 a u_{kA} (przebieg A) oraz 0 a u_{kB} (przebieg B). Przebieg zmian sygnału odzwierciedla proces zmiany wartości sygnału sterującego podczas sterowania przez człowieka lub przez sterownik.

Jeśli na wskaźniku zamiast wartości rzeczywistych A, B są prezentowane wartości zmodyfikowane A', B', to istnieje możliwość, że działanie regulatora będzie reakcją na stan, a więc możliwe jest działanie dwustanowe – zadanie wartości sterującej zmieniającej stan, a następnie przerwanie tego procesu.



Rys. 5.16. Sygnał sterowany i sygnał sterujący podczas zmiany wartości zadanej (set-point)

Istotne dla poprawności działania sterującego jest określenie chwili, w której należy zmienić sygnał sterujący. Wartość wskazywana w momencie, kiedy wymagana jest zmiana wartości sterującej, może być bliska wartości, która ma być osiągnięta. Taka modyfikacja zmniejszy obciążenie czynnością analizy sygnału i jego zmienności. Na podstawie zaprezentowanego eksperymentu symulacyjnego można postawić następującą hipotezę:

Wprowadzenie modyfikacji (5.49) wskaźnika może zmienić charakter działania człowieka sterującego, sprowadzając to działanie do reakcji na stan, bez konieczności ciągłego przetwarzania informacji.

W monografii [224] oraz opracowaniu [26] przedstawione zostały najważniejsze efekty powodowane przez wykorzystanie podanego sposobu modyfikacji wielkości wyświetlanej. Głównymi cechami są poprawienie się jakości sterowania oraz zwiększenie poziomu wysiłku po wprowadzeniu zmiany.

Kolejna wada wyświetlacza przyspieszonego polega na zwiększaniu poziomu szumów, co przez wyższy poziom sygnału błędu pozornego jest jedną z przyczyn zwiększenia wysiłku człowieka operatora. Usunięcie tej wady jest możliwe dzięki wykorzystaniu koncepcji adaptacyjnej zmiany charakterystyki wyświetlacza (pkt 5.6).

5.5.3. Wyświetlacz predykcyjny

Wyświetlacz predykcyjny (*predictive display*) jest prezentacją stanu, w której poza aktualną wartością pokazuje się wartość lub wartości przewidywane w przyszłości. Graficzna forma prezentacji zmienia sposób przetwarzania informacji przez człowieka operatora. Następuje zmiana formy przetwarzania na porównywanie obrazu z wzorcami odpowiadającymi charakterystykom poprawnych przebiegów zmian stanu. To z kolei umożliwia graficzną interpretację ograniczeń oraz przewidywanie skutków sterowania (oczywiście jakość w tym zakresie zależy od zastosowanego algorytmu predykcji i modelu procesu sterowanego).

Prosty predyktor postaci:

$$\hat{x}(t + \tau/t) = x(t) + \dot{x}(t)\tau \quad (5.52)$$

wymaga jedynie informacji o wartości zmiennej i jej pochodnej, natomiast istnieje możliwość wykorzystania kolejnych pochodnych, przez rozwinięcie funkcji w szereg Taylora. Wartość błędu predykcji narasta w czasie wraz ze zmianą wartości rzeczywistej pochodnej, stąd ograniczenie horyzontu czasowego zależne od charakteru i poziomu zmienności tego sygnału oraz praktyczne ograniczenie wykorzystania pochodnych rzędu wyższego niż 2.

Na podstawie modelu procesu dynamicznego stan przyszły można określić, wykorzystując więcej informacji. Rozwiązując równanie:

$$\bar{x}(s) = f(\hat{x}(s)) + g(\hat{x}(s))\hat{u} \quad (5.53)$$

przy warunkach początkowych:

$$\hat{x}(0) = x(t), \hat{u}(0) = u(t) \quad (5.54)$$

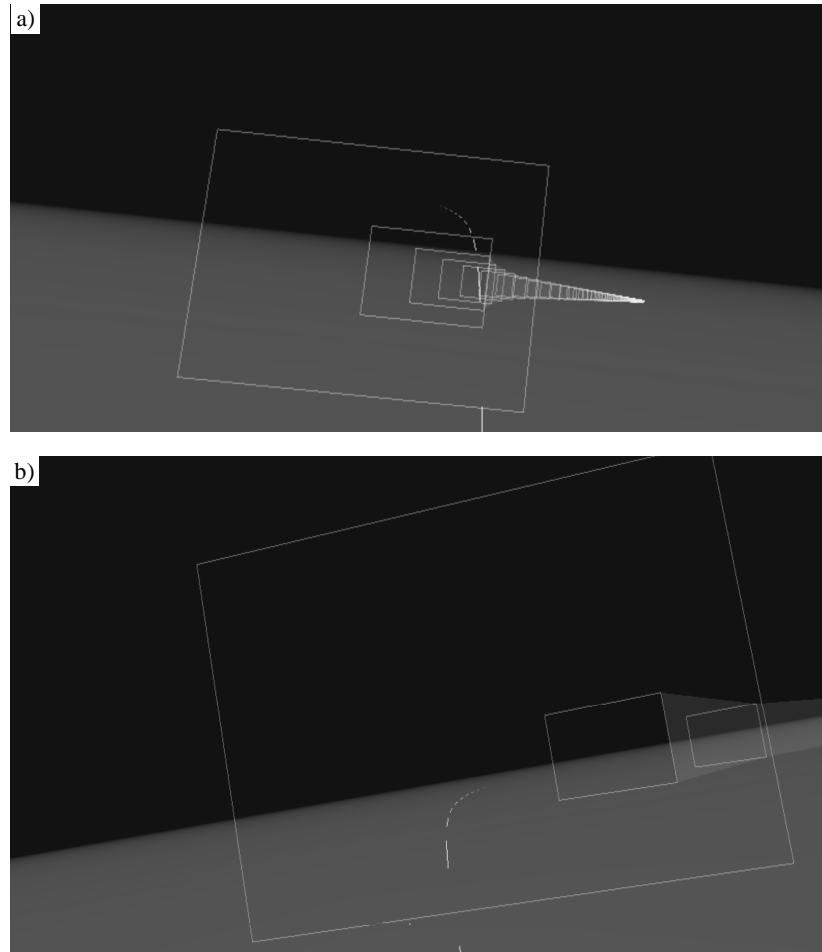
wartość przewidywana jest określona pewną zależnością:

$$\hat{x}(t + \tau|t) = \hat{x}(s)|_{s=\tau} \quad (5.55)$$

W podanych zależnościach przyjęto, że wartość sygnału sterującego jest stała w całym okresie predykcji: $\hat{u}(s) = \hat{u}(0)$. To założenie można zmienić, jeśli

istnieją przesłanki co do przyszłych wartości sygnału sterującego, jednak w przypadku wskaźnika predykcyjnego należy raczej przyjąć, że wskazanie powinno obrazować przewidywaną dla danego sposobu sterowania ewolucję stanu, aby człowiek mógł ocenić przyszłe skutki swojego działania.

Jednym z istotnych zastosowań prezentacji z predykcją jest zadanie sterowania samolotem na trajektorii. Jeśli znana jest trajektoria zadana, prezentację projekcji tej trajektorii najlepiej przedstawić w formie wskaźnika tunelowego o wymiarach zależnych od wymaganej dokładności. Wprowadzenie predykcji jest metodą wspomaganiania sterowania przez pilota przez wpływanie na świadomość sytuacyjną.



Rys. 5.17. Przykładowa realizacja wskaźnika tunelowego (sekwencja ramek w przestrzeni) ze wskaźnikiem predykcyjnym (linia przerywana przewidywanej trajektorii): a) przy niezgodności trajektorii zadaną, b) widok w czasie lotu wewnątrz tunelu

W zagadnieniach predykcji często stosowane jest podejście polegające na prezentacji stanu aktualnego i stanu dla ściśle określonego czasu τ (przedstawione np. w pracach [153, 242]). Wtedy dobór czasu predykcji zależy od dynamiki obiektu, gdyż zarówno zbyt duża, jak i zbyt mała wartość τ powodują, że szybkość zmian położenia wskaźnika predycyjnego jest poza wartościami optymalnymi dla człowieka. Prezentacja trajektorii przewidywanej, w odróżnieniu od zagadnień dotyczących pojedynczej zmiennej stanu, powinna ułatwiać ocenę jakości sterowania oraz dobór sposobu sterowania przez człowieka – pilota samolotu bądź operatora stacji kontroli lotu samolotu bezzałogowego.

Przykładową prezentację wskaźnika tunelowego z przewidywaną trajektorią przedstawiono na rys. 5.17. Jest to jedna z form wizualizacji stosowanych na stanowisku badawczym. Pokazane dwie sytuacje obrazują lot niezgodny (a) oraz zgodny (b) z zadaną trajektorią. Ocena stanu lotu sprowadza się do porównania wzorców obrazów.

5.5.4. Modyfikacja charakterystyki dynamicznej sygnału ze sterownicy

Podobnie jak dla interfejsów informacyjnych charakterystykę sterownicy można ukształtować przez wprowadzenie elementów dynamicznych:

$$u_z(t) = \int_0^t g(t, \tau) \delta(\tau) d\tau \quad (5.56)$$

Szczególnym rozwiązaniem jest modyfikacja opisana zależnością:

$$u_z(t) = \int_0^t K \cdot \delta(\tau) d\tau \quad (5.57)$$

zmieniająca charakter sterowania procesem dynamicznym na prędkościowy.

Dla operatora liniowego kształtującego charakterystykę sterownicy zmiana entropii może być przybliżona zależnością (5.51). Zakładając wykorzystanie podczas sterowania sygnału sterującego u w pewnym przedziale i ustaloną rozdzielczość percepcji wychylenia, zmianę entropii można określić zależnością:

$$H'(y) = H(y) - \frac{1}{W} \log \int_w |G(f)|^2 df \quad (5.58)$$

gdzie: W – pasmo sygnału,

$G(f)$ – charakterystyka częstotliwościowa elementu dynamicznego.

Elementy dynamiczne określone zależnościami (5.49) i (5.50) wprowadzone w interfejsach sterujących wywołują przeciwne efekty w porównaniu z wpływem na entropię interfejsów informacyjnych.

Do określenia efektu zastosowanego elementu dynamicznego użyteczna będzie wartość informacji. Zwiększenie informacji następuje przez wprowadzenie elementu o charakterystyce dolnoprzepustowej. Kosztem uzyskania dodatkowej informacji jest większy zakres sygnału δ , który przekłada się na większy wysiłek fizyczny w procesie sterowania, gdy wykorzystuje się szerszy zakres sygnału sterującego u .

Wprowadzenie elementu zmniejszającego informację skutkuje zmniejszeniem wykorzystywanego zakresu sygnału δ . Obniżenie wysiłku wymaganego do szybkiego osiągnięcia dużych wartości sygnału sterującego jest składnikiem redukcji kosztu. Do oceny wartości informacji istotny jest także wpływ na jakość sterowania, czyli określenie, na ile redukcja informacji wpływa na realizację zadania.

5.6. Adaptacja charakterystyk interfejsów

5.6.1. Czynniki modyfikujące

Podstawą do adaptacji interfejsów jest zmienność stanu, w którym znajdują się procesy sterowane, w zależności od czynników zewnętrznych bądź sposobu sterowania. Zmiany stanu oraz zmiany realizowanych zadań powodują, że wartość informacji przekazywanej przez każdy z interfejsów zmienia się w czasie. Dostosowanie charakterystyk do zmian wartości informacji powinno korzystnie wpłynąć na realizację zadania.

W punkcie 5.5 przeprowadzona została analiza opisująca zagadnienie filtracji dla sygnałów, które są procesami stochastycznymi stacjonarnymi. W zagadnieniach równoczesnego sterowania wieloma procesami dynamicznymi zmienność sytuacji wiąże się z różnymi priorytetami z zakresu podjęcia działań i wymaganej jakości realizacji każdego z zadań cząstkowych. Zmiana warunków, w których prowadzone jest sterowanie, może wynikać zarówno z oddziaływania czynników zewnętrznych (zakłóceń), zmian właściwości układu (w wyniku zmiany parametrów, rekonfiguracji czy też awarii) oraz zmian z zakresu celu sterowania.

Rozważmy zmianę stanu procesu sterowania, w wyniku której od chwili t_0 część użyteczna sygnału w paśmie (f_1, f_2) staje się zgodnie z definicją 5.1 szumem. Naturalnym rozwiązaniem jest zastosowanie filtru o charakterystyce tłumiącej w podanym paśmie. Ponieważ jednak do chwili t_0 ta część sygnału jest użyteczna, to charakterystyka filtru powinna się zmienić. Wynika stąd konieczność adaptacji charakterystyk filtru.

Zostaną wyróżnione trzy sposoby modyfikacji (uogólniając zaprezentowane w pracy [211] sposoby modyfikacji, które oryginalnie dotyczyły zmian charakterystyk interfejsów informacyjnych):

- zależnie od stanu procesu (*process state-dependent* – PSD),

- zależnie od realizowanego zadania (*control task-dependent* – CTD),
- zależnie od ograniczeń (*process constraint-dependent* – PCD).

Modyfikacja PSD oznacza, że algorytm modyfikacji charakterystyk interfejsu wykorzystuje stan procesu do określenia prawidłowej charakterystyki interfejsu. CTD oznacza, że modyfikacja jest efektem dostosowania interfejsu do realizacji nowego zadania. PCD odnosi się do realizacji modyfikacji, gdy stan procesu znajduje się w pobliżu obszaru zabronionego lub niebezpiecznego i może się wiązać z ogólnie rozumianą funkcją ostrzegania przed niebezpieczeństwem.

Stosowane obecnie w różnych rozwiązaniach zmiany charakterystyk można zakwalifikować do podanych grup. W samolotach firmy Airbus zauważa się zmiany sposobu działania sterownicy wraz z całym systemem sterowania (są to elementy funkcjonalnie ze sobą połączone) zarówno w zależności od zadawanego wychylenia (występują strefy, gdzie zadane wychylenie jest interpretowane jako zadane przeciążenie oraz takie, że zadawane są wartości kątów), jak i stanu systemu (redukcja wspomaganie aż do przejścia do bezpośredniego przeniesienia wychyleń na powierzchnie sterowe przy niesprawnych komputerach sterujących) [46, 155, 289]. Ze sposobu działania komputerów sterujących wynika, że efekt wychyleń zależy od aktualnej oceny stanu samolotu, czyli modyfikacji wprowadzonej przez układy zabezpieczeń.

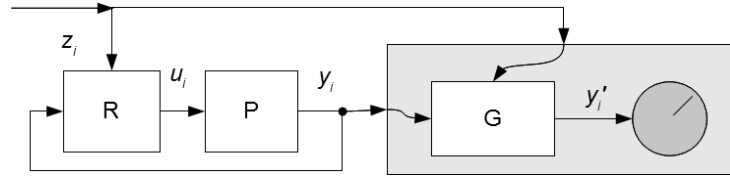
5.6.2. Adaptacja wskaźnika

Charakterystyka wskaźnika sygnału zwrotnego przy sterowaniu może się zmieniać, dostosowując do właściwości procesu sterowanego. Adaptacja ze względu na stan procesu oznacza, że zawartość interfejsów informacyjnych zależy od oceny stanu procesu sterowanego. W rozwiązaniu zestawu interfejsów informacyjnych system oceny decyduje o przekazywaniu określonych informacji, stąd system wskazań z adaptacją zawiera w sobie także elementy analizy informacji. Adaptacja na podstawie oceny wybranego parametru sygnału to rozwiązanie typu PSD.

Jeśli dostępna jest informacja o celu sterowania zawarta w sygnale zadanym z_i (rys. 5.18), to możliwe jest wprowadzenie modyfikacji CTD. Ocena wartości informacji, która może wynikać ze spodziewanego efektu uzyskiwanego w wyniku wykorzystania informacji bądź jej bezpośredniej przydatności w procesie sterowania, informuje o tym, jak prezentować każdą z wielkości.

Adaptację dynamiczną pojedynczego wskaźnika ze względu na stan można opisać jak w zależności:

$$y'(t) = \int_0^t g(s - \tau, \zeta) y(\tau) d\tau \quad (5.59)$$



Rys. 5.18. Struktura systemu sterowania z elementem modyfikującym wskazania; R – regulator, P – obiekt sterowany, G – element modyfikujący wskazania

Parametr ζ jądra operatora całkowego g zależy od pewnej właściwości sygnału, której wartość zwraca odpowiednio dobrany operator, np. operator wariancji:

$$T_{\sigma^2}(x)(t) = \int_{t-T_s}^t \frac{1}{T_s} \left(x(\tau) - \int_{t-T_s}^t \frac{1}{T_s} x(\tau) d\tau \right)^2 d\tau \quad (5.60)$$

Zmiana charakterystyk interfejsów informacyjnych przy wielu zmiennych umożliwia zmianę entropii informacji w poszczególnych częściach systemu zależnie od potrzeb. Niech będą dane dwa wskaźniki obrazujące dwie zmienne stanu procesu dynamicznego. Modyfikacja skutkująca równoczesnym zwiększeniem entropii w jednym wskaźniku i zmniejszeniem w drugim powoduje zwiększenie bodźców zwracających uwagę na wskaźnik pierwszy.

Niech sygnały y_1 (pierwszy) i y_2 (drugi) będą formowane przez elementy o charakterystyce:

$$G_i(s) = \frac{\zeta_i}{s + \zeta_i} \quad (5.61)$$

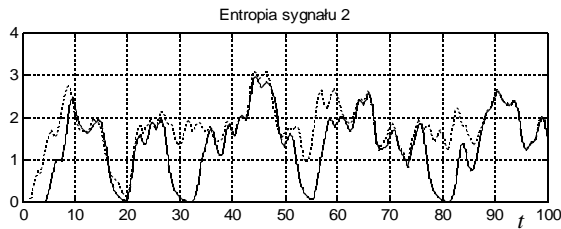
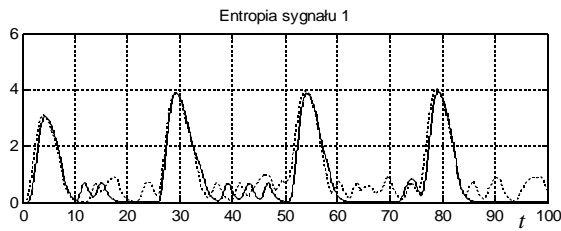
dając w efekcie sygnały y_{f1} i y_{f2} , które są prezentowane na wskaźnikach.

Zmiany wartości sygnału pierwszego mają charakter skoków z nałożonym sygnałem szumu. Drugi sygnał zmienia się w sposób losowy. Aby zwiększyć przekaz informacji wskaźnika pierwszego, wtedy gdy następują znaczne zmiany, wprowadzono element oceny zmienności sygnału. Wartości parametrów filtrów zależą od zmiennej ζ , będącej miarą zmienności sygnału pierwszego zgodnie z pewnymi funkcjami:

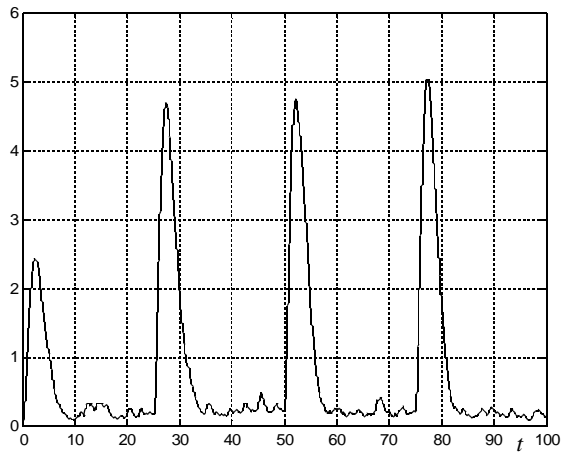
$$\zeta_i = f_i(\zeta) \quad (5.62)$$

tak że funkcja f_1 jest rosnąca, a funkcja f_2 malejąca.

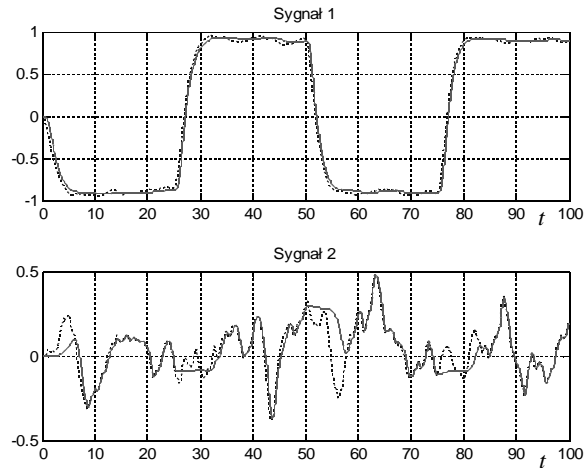
Dla przyjętych w eksperymencie symulacyjnym funkcji wartości entropii sygnału zmieniają się jak na rys. 5.19. Widać, że wzrost entropii sygnału y_{f2} zmniejsza się, gdy entropia sygnału y_{f1} wzrasta. Wartości parametru ζ_1 podczas eksperymentu symulacyjnego pokazuje rys. 5.20. Efekt, jaki można zaobserwować na wskaźnikach, przybliżają przebiegi czasowe wartości oryginalnych y_i oraz pokazywanych y_{fi} , przedstawione na rys. 5.21. Redukcja entropii sygnału y_{f2} do wartości bliskich zeru oznacza ustalenie się wartości tego sygnału. Następuje to w chwilach, gdy sygnał 1. zmienia stan ustalony. Po zmianie wartości wskazania sygnału 1. filtr silniej tłumí zakłócenia występujące w tym sygnale, natomiast sygnał y_{f2} odtwarza sygnał oryginalny y_2 .



Rys. 5.19. Entropia sygnałów oryginalnych (linia przerywana) i sygnałów ukształtowanych przez elementy (wzór (5.61)) (linia ciągła)



Rys. 5.20. Wartość współczynnika ζ_1 w czasie eksperymentu



Rys. 5.21. Przebiegi w czasie sygnałów oryginalnych (linia przerywana) i sygnałów ukształtowanych przez elementy (wzór (5.61)) (linia ciągła)

Przedstawiony przykład obrazuje możliwość zmiany zawartości interfejsów informacyjnych, co zgodnie z teorią Sandersa powinno prowadzić do oczekiwanych efektów, jednak ze względu na wpływ innych czynników nie rozstrzyga o tym, jak wprowadzone zmiany wpływają na działania człowieka operatora. Ocena stanu dokonywana przez człowieka operatora w szerszym kontekście niż sterowanie bieżące wartością jednej zmiennej, doświadczenie i wynikające z tego oczekiwania co do zachowania procesu sterowanego mogą modyfikować podejmowane decyzje i sposób działania.

Adaptacja interfejsów informacyjnych obejmuje także zmiany sposobu prezentacji. Często spotykanym w systemach wskazań rozwiązaniem jest wprowadzenie elementów, które mają ostrzegać – jest to zatem adaptacja typu PCD. Przykładem może być zmiana koloru bądź pojawienie się określonego elementu graficznego (jak na rys. C11, dodatek C, wprowadzenie okręgu po przekroczeniu założonego granicznego kąta przechylenia).

Adaptacja wskazań zależnie od wykonywanego zadania oznacza zmianę formy lub zawartości informacyjnej zależnie od wymagań realizowanego zadania. Mimo że taka koncepcja wydaje się atrakcyjna, to uwzględniając właściwości człowieka, nie można dopuścić do zmian polegających na umieszczaniu w różnym czasie w tym samym polu różnych informacji. Mogą one powodować błędną interpretację prezentowanych wartości. Stąd dobrą zasadą jest wykorzystywanie pewnego stałego zestawu informacyjnego i wprowadzanie informacji dodatkowych wynikających ze sposobu sterowania. Przykładowo, na rys. C11 (dodatek C) widoczny jest wskaźnik ścieżki (kwadrat z lewej strony sztucznego horyzontu) pomocny podczas lądowania, który nie jest aktywny w czasie przelotu (rys. C11b, dodatek C).

5.6.3. Badanie systemu wskaźń

Celem sprawdzenia zaprezentowanych teorii zostały wykonane testy. Pierwszy test dotyczył nieadaptacyjnych modyfikacji charakterystyk wskaźników, w drugim natomiast porównano metody adaptacyjne [211, 215]. Testy zestawów wskaźników zostały przeprowadzone jako zadanie sterowania dwoma procesami dynamicznymi, opisanymi transmitancjami:

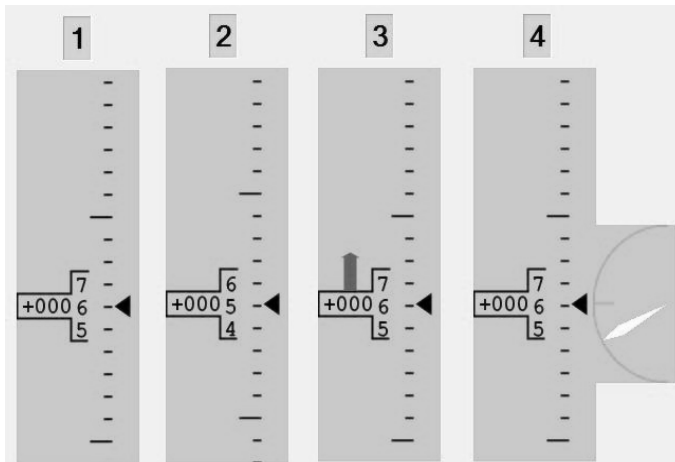
$$G(s) = \frac{K}{(Ts+1)s} \quad (5.63)$$

$$G(s) = \frac{ka}{(Ts+1)(s-a)} \quad (5.64)$$

za pomocą dwuosiowej sterownicy pasywnej ze sprężynami powrotnymi.

Proces dynamiczny (wzór (5.63)) reprezentował zadanie właściwe, a zatem wartość wyjściowa była prezentowana na wskaźniku głównym. Proces (5.64) służył do zmiany obciążenia zadaniowego. W trakcie testów obciążenie to zwiększało się przez zmianę wartości parametru a .

Zastosowane wskaźniki zostały przedstawione na rys. 5.22. Wskaźnik 1. prezentował wartość sygnału wyjściowego. We wskaźnikach 3. i 4. wprowadzono elementy prezentujące wartość pochodnej, natomiast wskaźnik 2. został skonstruowany jako przyspieszony.



Rys. 5.22. Widok wskaźników wykorzystywanych podczas testów

Podczas eksperymentu wartość, jaką należało utrzymywać, była wyświetlana na ekranie obok badanego wskaźnika. Na procesy dynamiczne poza sygnałem

sterującym oddziaływały zakłócenia losowe. Zadanie dodatkowe polegało na utrzymywaniu wskazania wielkości wyjściowej w położeniu centralnym.

W pierwszej serii badany był wpływ wykorzystania pochodnej, prezentowanej w różny sposób, na jakość sterowania oraz wysiłek występujący przy sterowaniu. W teście uczestniczyło 11 osób, w tym czterech pilotów samolotowych i jeden szybowcowy. Analizowano zarejestrowane przebiegi wartości zmiennych oraz wyniki ankiety, w której każdy z uczestników porównywał wskaźniki parami (każdą parę z czterech wskaźników) pod względem:

- łatwości sterowania,
- uzyskiwanej jakości sterowania,
- obciążenia zadaniem sterowania.

Wynikiem dla każdego z badanych rozwiązań była liczba par, w której dany wskaźnik został wybrany. Liczba wyborów każdej opcji została podzielona przez liczbę możliwych wyborów i uzyskany wynik (z przedziału wartości od 0 do 1) określał ocenę opcji wskaźnika. Następnie wyniki zostały opracowane z wykorzystaniem metody rang.

Test został zrealizowany dwuetapowo. W pierwszym etapie uczestnik testu zapoznawał się ze wskaźnikami i samym zadaniem podstawowym (poziom obciążenia zadaniem dodatkowym był mały) oraz wypełniał ankietę wstępną A. Następnie testował kolejno wskaźniki i jeszcze raz wypełniał ankietę B. Wyniki zebrane w tab. 5.1 pokazują, że w warunkach obciążenia następuje zmiana w zakresie odczuwanej przez uczestnika testu łatwości sterowania.

Tabela 5.1. Wyniki ankiety

Wskaźnik	Łatwość		Dokładność		Obciążenie	
	A	B	A	B	A	B
1.	0,57	0,67	0,7	0,67	0,3	0,45
2.	0,72	0,57	0,57	0,64	0,45	0,48
3.	0,42	0,33	0,36	0,3	0,64	0,61
4.	0,27	0,36	0,36	0,3	0,42	0,42

Jakość sterowania po określeniu wskaźnika błędu:

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^N e_i}{N} \quad (5.65)$$

została także oceniona metodą porównawczą (tab. 5.2). Należy zwrócić uwagę, że wyniki w grupie pilotów były znacznie lepsze (niższy poziom odchylenia od wartości zadanych).

Tabela 5.2. Ocena jakości sterowania przez porównanie dokładności utrzymywania wartości zadanej

Wskaźnik	Ocena jakości zadania głównego*	Ocena jakości zadania dodatkowego
1.	0,82 (0,90)	0,50
2.	0,48 (0,47)	0,66
3.	0,58 (0,43)	0,38
4.	0,15 (0,20)	0,36

* – w nawiasie wyniki dla grupy pilotów.

Uzyskany wynik potwierdza zdolność człowieka do wykorzystania dodatkowej informacji, co dotyczy zwłaszcza osób wytrenowanych. Pojawia się pytanie o rolę selekcji, jakiej podlegają piloci, gdyż dwie osoby spoza grupy pilotów nie tylko nie potrafiły wykorzystać dodatkowej informacji, ale także stwierdziły, że dodatkowy element wskaźnika im przeszkadzał.

Kolejny wniosek z testów pokrywa się z informacjami o wskaźnikach przyspieszonych [224]. Mimo uzyskiwania znacznie lepszych wyników z zakresu dokładności sterowania w stosunku do wskaźnika standardowego fakt ten nie znajduje odzwierciedlenia w subiektywnej ocenie badanych. Ten typ wskaźnika „wymusza” także największy wysiłek przy sterowaniu.

Druga seria testów dotyczyła wpływu adaptacji dynamicznych właściwości elementu formującego wartość prezentowaną na wyświetlaczu i została wykonana po przeprowadzeniu analizy wyników testu pierwszego. Zastosowane zostały dwa elementy formujące – jeden zmniejszający pasmo:

$$\frac{dx_f}{dt} = \alpha_f x_f + (1 - \alpha_f) \cdot x \quad (5.66)$$

i drugi przyspieszający:

$$x_d = x + \alpha \cdot \dot{x} \quad (5.67)$$

przy czym realizowana była adaptacja typu PSD. Wielkością wykorzystywaną do zmian charakterystyk była wartość pochodnej sygnału.

Zrealizowane zostały następujące wskaźniki:

1. – referencyjny, prezentujący wartość niezmienną,
2. – przyspieszony (wzór (5.67)), gdzie α zmieniało się zależnie od wartości prędkości,
3. – z filtrem (wzór (5.66)) dla małych wartości prędkości,
4. – łączący właściwości dwóch poprzednich.

Na podstawie analizy wartości informacji zostały sformułowane następujące hipotezy:

- I: wskaźnik 2. – poprawa jakości sterowania, a równocześnie obniżenie wysiłku ze względu na dostarczanie informacji dostosowanej do potrzeb,

II: wskaźnik 3. – przekazywanie niższego poziomu zakłóceń w wyniku ukrycia małych zmian; możliwe jest zmniejszenie wysiłku przy sterowaniu kosztem powiększenia niedokładności utrzymywania wartości bliskich zadanym,

III: wskaźnik 4. – zmniejszenie wartości dużych odchyłek, a zwiększenie małych i obniżenie wysiłku przy sterowaniu.

W tym teście wzięło udział 12 osób. Wyniki ankiet (tab. 5.3 i 5.4) wskazują na preferencję wskaźnika 2. zgodnie z postawioną hipotezą I. Dodatkowo, przedstawione na rys. 5.23-5.25 wyniki potwierdzają, że obserwowana przez uczestników testu dokładność jest zgodna z rzeczywistymi wynikami. Równocześnie widać, że poprawie dokładności towarzyszy zmniejszenie poziomu sygnału sterującego. Można to powiązać z efektywniejszym tłumieniem zakłóceń, które są obserwowane wcześniej, co ułatwia sterowanie. Stąd wniosek, że wprowadzona modyfikacja wyeliminowała wadę wskaźnika przyspieszonego.

Tabela 5.3. Wyniki ankiety wstępnej

Wskaźnik	Łatwość	Dokładność	Obciążenie
1.	0,64	0,57	0,45
2.	0,88	0,77	0,21
3.	0,09	0,17	0,82
4.	0,39	0,50	0,52

Tabela 5.4. Wyniki ankiety po teście z obciążeniem

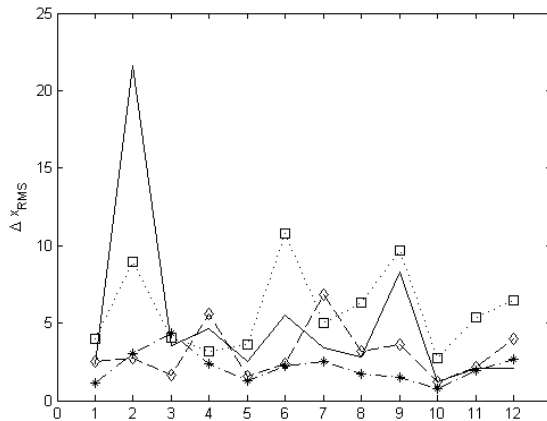
Wskaźnik	Łatwość	Dokładność	Obciążenie
1.	0,67	0,72	0,33
2.	0,72	0,69	0,27
3.	0,19	0,11	0,90
4.	0,47	0,47	0,50

Porównanie wyników zaprezentowanych na rys. 5.24 i 5.25 świadczy o konieczności rozsądnego podejścia do analizy rezultatów eksperymentów. Dla zaprezentowanych rozkładów zmiennych analiza wartości przeciętnych wykazuje jedynie w przypadku par 2-3 i 3-4 (dla wartości średniokwadratowej błędu) i 1-2 i 2-3 (dla sygnału sterującego) na możliwość odrzucenia hipotezy zerowej o równości wariancji na poziomie istotności 0,05. Uwzględniając różnice pomiędzy poszczególnymi osobami, wyniki przekształcono zgodnie z zależnością:

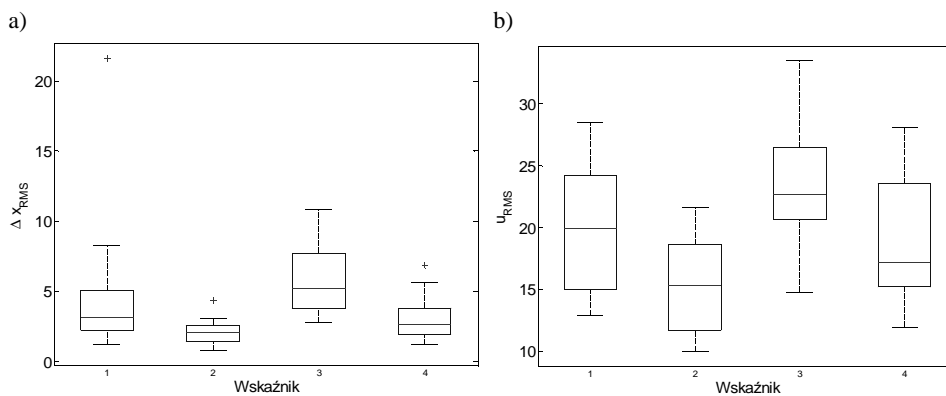
$$x' = \frac{x}{x_0} \quad (5.68)$$

gdzie wartość odniesienia x_0 to wynik dla wskaźnika 1. Dla tak przetworzonych wyników jedynie dla sygnału poziomemu błędowi dla pary 1-3 nie można odrzucić hipotezy zerowej ($p = 0,12$).

Należy jeszcze zwrócić uwagę, że większość osób wybierających wskaźnik 2. dokonywała tego wyboru konsekwentnie we wszystkich kategoriach.

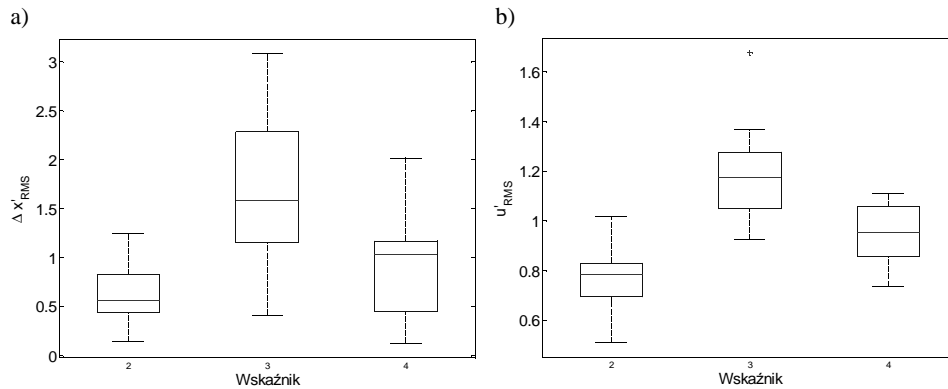


Rys. 5.23. Wartości średniokwadratowe błędów uzyskane przez uczestników testów; wskaźnik 1. – linia ciągła, 2. – linia kreska kropka z gwiazdami, 3. – linia kropkowana z kwadratami, 4. – linia kreskowana z rombami



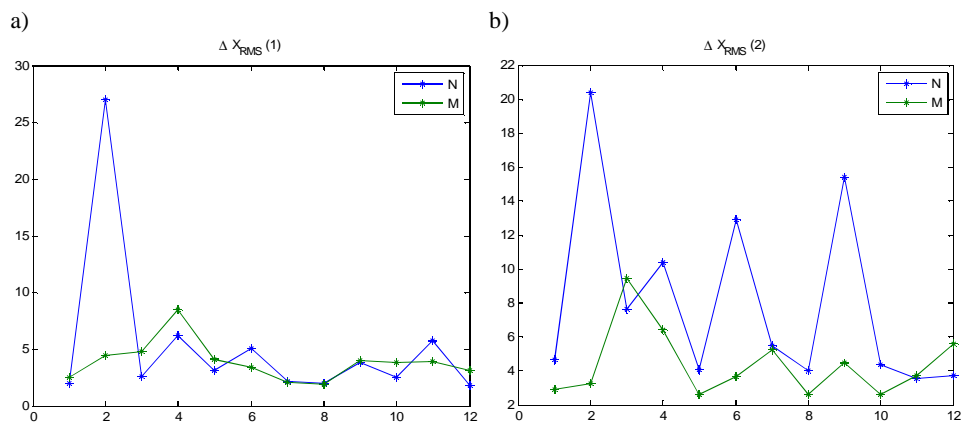
Rys. 5.24. Rozkład wartości średniokwadratowych: a) błędów dla poszczególnych wskaźników, b) sygnału sterującego dla poszczególnych wskaźników

Wskaźnik 3. spowodował zwiększenie poziomu zakłócenia, równocześnie powodując nadmierne obciążenie niezgodnie z hipotezą II. Taki wynik sugeruje, że człowiek, stwierdzając nieadekwatność przekazu, uruchamia mechanizmy odtwarzające brakującą informację bądź modyfikuje działania w celu kompensacji niedoboru skutkujące wyższym obciążeniem. Wniosek z tego testu jest istotny dla interfejsów informacyjnych, gdyż dostarczają one informacji zmierzonych przez urządzenia, które często mają charakterystyki podobne do przedstawionej wzorem (5.66).

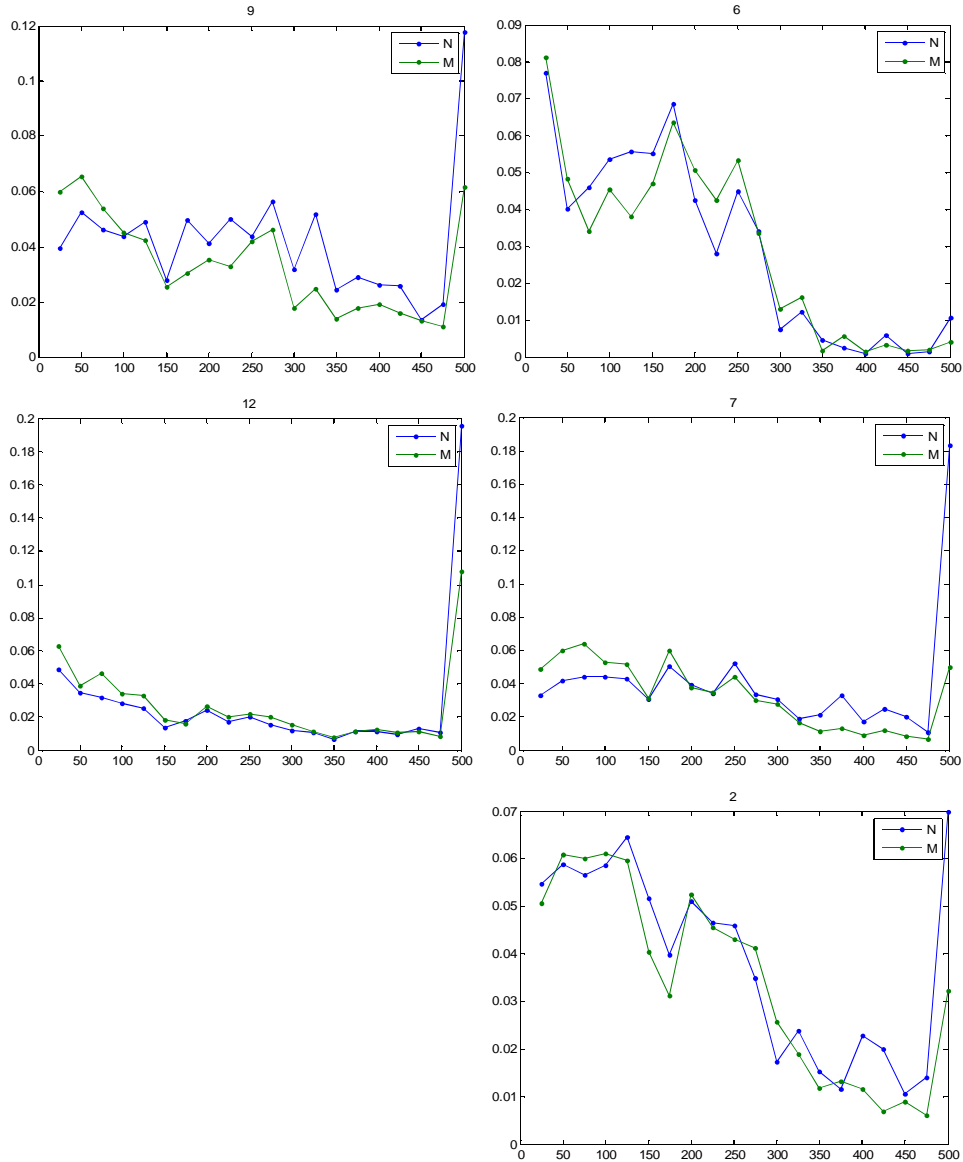


Rys. 5.25. Rozkład wartości odniesionych do wskaźnika referencyjnego (wzór (5.68)): a) błędu, b) sygnału sterującego

Ocena subiektywna i analiza wyników rejestracji wskaźnika 4. nie są zgodne. Oznacza to, że zastosowany algorytm zmian charakterystyk niekoniecznie jest odpowiedni. Wyniki eksperymentu wskazują, że modyfikacja zastosowana we wskaźniku 2. jest najkorzystniejsza. Wykonane analizy zarejestrowanych wyników pozwoliły na określenie przyczyn tego stanu. Na rysunku 5.26 zostały zaprezentowane wartości miary błędu z rozróżnieniem fazy początkowej z małym obciążeniem zadaniem dodatkowym i fazy drugiej, gdy obciążenie było duże. Widoczny jest znaczny wzrost błędu w fazie z obciążeniem dla wskaźnika 1. (uczestnicy: 4., 6. i 9.). Równocześnie dla dwóch uczestników ten sposób wskaźnika spowodował pogorszenie wyników (uczestnik 3. i 12.) w obydwu fazach. Z porównania tych efektów z wyrażonymi opiniami wynika, że uczestnik 3. wskazywał jako lepszy wskaźnik 1., natomiast uczestnik 12. – wskaźnik 2. i do tego obydwaj dokonali takiej oceny we wszystkich kategoriach.



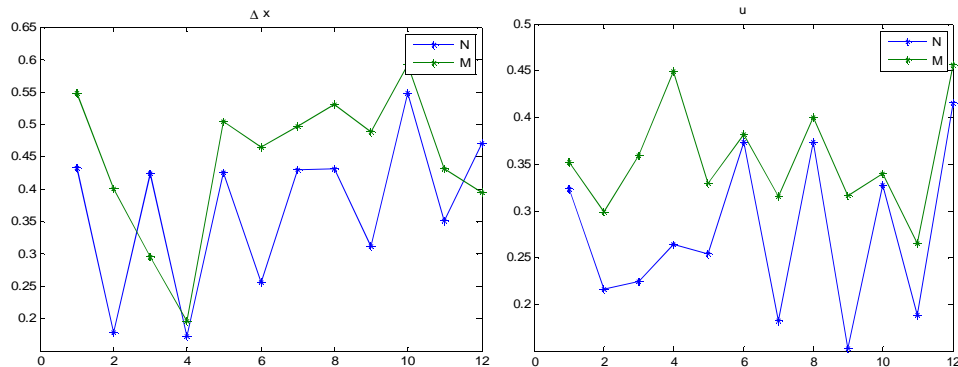
Rys. 5.26. Wartości średniokwadratowe błędów uzyskane przez uczestników w pierwszej fazie (a) i w drugiej fazie (b) eksperymentu dla wskaźników: 1. – N, 2. – M



Rys. 5.27. Histogramy sygnału sterującego wybranych uczestników testu (9., 6., 12., 7., 2.) dla wskaźników: 1. – N, 2. – M

Wyniki uczestnika 2. znacznie odbiegają od innych. Możliwą przyczyną jest proces nabywania umiejętności w miarę realizacji, gdyż dla tego uczestnika kolejność realizacji była następująca: 1:2:3:4. Zastanawiające jest, że ocena subiektywna wyrażona w ankiecie w tym przypadku nie zgadza się z wynikami testu (we wszystkich kategoriach najlepszy był wskaźnik 1., a następnie 2.).

Próbując wyjaśnić przyczyny tych różnic, wykonano histogramy unormowanych sygnałów sterujących (rys. 5.27) z usuniętymi wartościami bliskimi zero (zaprezentowane osobno na rys. 5.28). Charakterystyki dla dwóch osób (12. i 7.) wykazują, że stosowały one taktikę sterowania dwustanowego, przy czym jedna czyniła to bardzo efektywnie (12.). Można się pokusić o próbę wyjaśnienia lepszych wyników ze wskaźnikiem podstawowym. Bezpośredni przekaz informacji ułatwił prawdopodobnie wytworzenie modelu mentalnego potrzebnego przy sterowaniu dwustanowym. Z kolei we wszystkich histogramach widoczne jest zmniejszenie wykorzystania wartości skrajnych dla wskazań 2. Równoczesne zwiększenie poziomu wykorzystania małych wartości oznacza działanie jak regulator, co oznacza, że wskaźnik typu 2. jest korzystny, jeśli sposób działania człowieka jest typu regulatorowego.

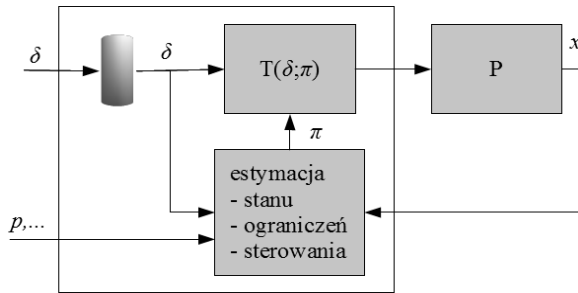


Rys. 5.28. Wyniki z histogramów dla wartości błędu bliskiej zero (oznaczenie Δx) oraz dla wartości sygnału sterującego bliskiej zero (oznaczenie u) dla wskaźników: 1. – N, 2. – M dla poszczególnych uczestników testu

Sterowanie z wykorzystaniem wskaźnika 2. dla większości uczestników testu cechuje się dłuższymi niż dla innych wskaźników okresami, w których błąd był bliski zero, a równocześnie częściej sterownica znajdowała się w położeniu zero.

5.6.4. Adaptacja charakterystyk interfejsów sterujących

Adaptacja charakterystyk interfejsów sterujących polegająca na kształtowaniu sygnału sterującego umożliwia dostosowanie charakterystyk do aktualnego stanu systemu sterowanego, realizowanego zadania, czy nawet stanu osoby sterującej. Na rysunku 5.29 została przedstawiona struktura systemu, w którym sygnał sterujący wynika z działania pewnego operatora T na sygnał zadawany przez interfejs sterujący. Parametry π , określające aktualne charakterystyki operatora, mogą wynikać z analizy całościowej stanu i sterowania, co pozwala na realizację każdej z modyfikacji (PSD, CTD i PCD) charakterystyk interfejsu.



Rys. 5.29. Ogólna struktura systemu sterowania z układem adaptującym charakterystyki interfejsów sterujących

Ze względu na wiele możliwości wykorzystania ogólnej koncepcji celem ilustracji zostaną zaprezentowane wybrane sposoby kształtowania interfejsów.

Zasada stałej efektywności sterowania – przykład modyfikacji typu PSD

Jeśli sterowany proces jest opisany zależnością (3.2), to wtedy jawnie występuje wpływ stanu na efektywność sterowania. Jeśli wskazane jest, aby efekt sterowania był niezależny od stanu lub korzystne jest zmniejszenie tego efektu, to wówczas zastosowanie zależności:

$$g(x) \cdot T(\delta; \hat{x})(t) \approx K \cdot \delta \quad (5.69)$$

w której \hat{x} jest obserwowanym stanem procesu, K natomiast pewną dobraną stałą, powoduje, że efektywność reakcji w sensie pochodnej stanu zostaje uniezależniona od stanu.

W szczególności, jeśli sterowanie jest prędkościowe, wtedy bezpośredni efekt sterowania (wartość pochodnej wielkości sterowanej) jest obserwowany jako szybkość zmiany wartości wielkości sterowanej x_i . Zastosowanie zasady stałej efektywności w stanie ustalonego ruchu prowadzi do funkcji kształtującej g' zależnej od stanu ustalonego (wykorzystującej dostępne bezpośrednio lub estymowane wartości zmiennych stanu poza zmienną x_i), dla której rozwiązanie równania:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \dot{x}_i \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} = f \left(\begin{bmatrix} x_0 \\ \vdots \\ x_i \end{bmatrix} \right) + g \left(\begin{bmatrix} x_0 \\ \vdots \\ x_i \end{bmatrix} \right) \cdot g'(\hat{x}_0) \cdot \delta \quad (5.70)$$

dla ustalonej wartości $\delta = \delta_0$ jest określone zależnością:

$$\dot{x}_{i0} \approx K \cdot \delta_0 \quad (5.71)$$

Modyfikacja dynamiki

Wprowadzenie operatora całkowego odpowiadającego określonymu układowi dynamicznemu (5.56) umożliwia modyfikację sygnału zgodnie z założoną charakterystyką, np. (5.49) lub (5.50). Jądro operatora można uzależnić od stanu procesu i ewentualnie ograniczeń $g(t, \tau; \hat{x})$ (czyli modyfikacje typu PSD i PCD) lub wartości wynikającej z celu sterowania $g(t, \tau; \hat{y}_d)$ ⁹. O ile pierwsza modyfikacja jest oczywista, to wprowadzenie modyfikacji typu CTD wymaga określenia stanu docelowego. W dalszych rozważaniach zostanie przyjęte, że cel sterowania jest znany jedynie człowiekowi, a nie został przekazany do systemu. Intencje człowieka można oceniać jedynie przez analizę właściwości sygnałów zadawanych i wartości niektórych zmiennych stanu. Ocenę intencji na podstawie samego sygnału sterującego realizuje więc pewien operator:

$$\hat{y}_d = T_y(\delta)(t) \quad (5.72)$$

gdy natomiast uwzględni się wybrane zmienne stanu, będzie to operator:

$$\hat{y}_d = T_y \left(\begin{bmatrix} \delta \\ C_I \cdot x \end{bmatrix} \right)(t) \quad (5.73)$$

w którym C_I jest niekompletną jednostkową macierzą wybierającą zmienne stanu istotne dla oceny.

Przykładem operatora typu (5.72) jest estymator składnika celowej zmiany zmiennej sterowanej:

$$\bar{y} = k \cdot \delta \quad (5.74)$$

dla układu stacjonarnego. Gdy $k(x) \approx g(x)$, operator jest typu (5.73) i ma zastosowanie dla układu niestacjonarnego.

5.7. Sterowanie ze zmianą poziomu wspomagania zależnie od wartości sterującej

5.7.1. Metodyka sterowania ze zmianą trybów

Zasada sterowania ze zmianą trybów wynika z wyróżnienia dwóch warstw w informacji przekazywanej przez sygnał sterujący:

- znaczeniowej,
- sygnałowej.

⁹ Konsekwentnie parametrami jądra operatora są wartości estymowane.

Warstwa znaczeniowa wynika z zastosowanego rodzaju sterowania oraz przyjętego celu, który ma być osiągnięty w procesie sterowania. Określa ona sposób interpretacji wartości zadawanej przekazywanej w warstwie sygnałowej. Podczas sterowania realizowanego w strukturze warstwowej w warstwie znaczeniowej zawarta jest informacja o tym, jakie sterowniki mają być obecnie aktywne.

Niech sygnał wyjściowy ze sterownicy δ zawarty w przedziale $D = (\delta_{\min}, \delta_{\max})$ będzie podzielony na rozłączne przedziały: $D_1, D_2, \dots, D_n, D'_n, \dots, D'_2, D'_1$, takie że zapewniają one pełne pokrycie:

$$D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D'_2 \cup D'_1 = D \quad (5.75)$$

oraz spełnione są warunki:

$$\forall i, \forall \delta_1 \in D_i, \forall \delta_2 \in D_{i+1}, \delta_1 < \delta_2 \quad (5.76)$$

$$\forall i, \forall \delta_1 \in D'_i, \forall \delta_2 \in D'_{i+1}, \delta_2 < \delta_1 \quad (5.77)$$

Sterowanie w każdym z przedziałów jest realizowane zgodnie z algorytmem R_i , gdzie i jest odpowiednim indeksem zbioru.

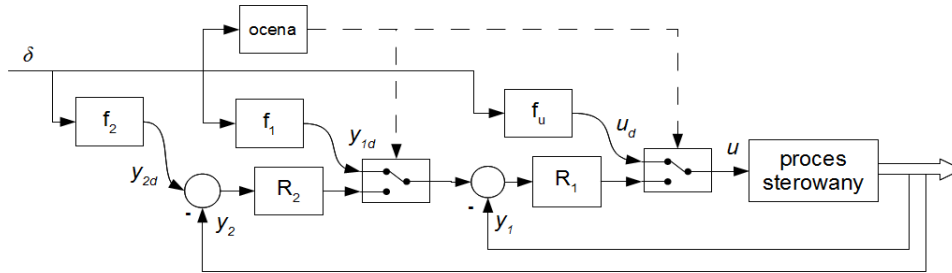
Niech granica przedziałów D_n i D'_n będzie położeniem neutralnym sterownicy. Sterowanie w przedziałach D_n i D'_n powinno być realizowane na najwyższym poziomie kontroli dla struktury warstwowej lub w innych zastosowaniach przy najwyższym poziomie automatyzacji. Uzasadnienie wynika z następujących przesłanek:

- celowe pozostawienie sterownicy przez operatora powoduje jej przestawienie w położenie neutralne, a zatem może być w naturalny sposób potraktowane jako rozkaz pełnej automatyzacji,
- przerwanie działań sterujących przez operatora spowodowane czynnikami zewnętrznymi (np. koniecznością realizacji innych czynności) nie powinno pozostawiać systemu sterowania w trybie, który stwarza zagrożenie dla bezpieczeństwa działania systemu,
- w sytuacji zaniku sygnału sterującego (np. chwilowej przerwy w transmisji) system sterowania powinien bezpiecznie kontynuować sterowanie, przyjmując zerową wartość sygnału sterującego,
- duże wartości sygnału sterującego oznaczają zamiar wprowadzenia dużych zmian stanu i można wtedy postawić tezę, że nie jest konieczne uzyskanie precyzji, lecz odpowiednio dużej szybkości,
- małe wartości sygnału sterującego oznaczają zamiar wprowadzenia niewielkich korekt stanu.

Z przedstawionych spostrzeżeń wynika, że im niższy indeks trybu sterowania, tym mniejszy poziom wspomaganie przez układy automatyki. Dla skrajnych przedziałów D_1 i D'_1 , jeśli to konieczne, wartość sygnału ze sterownicy może

być przeniesiona bezpośrednio na sygnał sterujący (czyli w samolocie na powierzchnie sterowe).

Strukturę systemu sterowania realizującą zmienny poziom wspomagania ilustruje rys. 5.30. Struktura ta wynika z wprowadzenia możliwości rekonfiguracji w strukturze warstwowej. W zaprezentowanej strukturze przewidziane są dwa regulatory ($n = 3$). Sygnały zadane dla regulatorów są efektem odpowiedniego przekształcenia sygnału ze sterownicy δ przez funkcje formujące f_1 , f_2 . W zależności od oceny sygnału δ wybierane są aktywne elementy systemu.



Rys. 5.30. Struktura systemu sterowania ze zmiennym poziomem wspomagania

Zmiana znaczenia sygnału sterującego może być także potraktowana w kategoriach kompatybilności informacyjnej. Oceniając sygnał δ pod kątem tego, jaką informację przekazuje człowiek do systemu sterowania, z łatwością wyróżnia się co najmniej trzy zakresy, które znajdują odzwierciedlenie w aktywnej strukturze systemu wspomagającego.

Jeśli sygnał należy do przedziału $D_n \cup D'_n$, oznacza to, że człowiek nie chce ingerować w sposób sterowania. Wtedy system sterowania powinien realizować sterowanie, którego ogólnymi cechami są:

- tłumienie zakłóceń,
- utrzymywanie stanu obiektu sterowanego w bezpiecznym zakresie,
- przemieszczanie w przestrzeni stanów zgodne z zadanymi parametrami.

Wartość sygnału δ w zbiorach od $D_{n-1} \cup D'_{n-1}$ do $D_2 \cup D'_2$ oznacza, że człowiek ma zamiar zmienić aktualne wartości sygnałów będących zmiennymi stanu procesu sterowanego, co w zaprezentowanej strukturze przekłada się na odpowiednie wartości zadane dla systemu sterowania. Możliwość rozróżnienia kilku zakresów warunkuje liczbę kolejnych wewnętrznych pętli sterujących.

Działanie systemu sterowania w zbiorze $D_{n-1} \cup D'_{n-1}$ powinno umożliwić realizację procesu precyzyjnej zmiany wartości y_2 , w odróżnieniu od zbioru $D_2 \cup D'_2$, kiedy wymaganiem jest duża szybkość zmiany wartości.

Zbiór $D_1 \cup D_1'$, gdy następuje bezpośrednie przeniesienie wychylenia sterownicy na wejście obiektu sterowanego, umożliwia osiągnięcie stanów niemożliwych do uzyskania przy zastosowaniu regulatorów systemu sterowania (np. nieograniczona zmiana wartości sygnału y_1 , jeśli sterowanie procesem dynamicznym ma charakter prędkościowy). Ten sposób sterowania powinien być więc stosowany jedynie wtedy, kiedy wprowadzenie regulatora (pętla wewnętrzna na rys. 5.30) istotnie ogranicza osiągalność stanów niezbędnych do realizacji zadania.

W procesie sterowania mogą zaistnieć sytuacje wymagające wykorzystania maksymalnych wartości sygnału sterującego, które są jednak ograniczone ze względu na zagrożenie bezpieczeństwa. W przedziale $D_1 \cup D_1'$ może się zatem pojawić potrzeba wprowadzenia układów zabezpieczających przez przekroczeniem ograniczeń. Przykładem jest manewr uniknięcia CFIT w samolocie A330, polegający na pełnym wychyleniu sterownicy [235]. Dzięki wspomaganemu sterowaniu system kontrolujący parametry lotu zabezpiecza przed przeciągnięciem, realizując w efekcie sterowanie ekstremalne. Wówczas pilot nie jest obciążony monitorowaniem stanu i korygowaniem sygnału sterującego jak przy klasycznych procedurach.

Wstępne badania koncepcji sterowania ze zmianą poziomu wspomagania zostały wykonane w ramach projektu technologii dla systemów sterowania samolotów bezzałogowych [49, 222]. Stanowisko badawcze oparte na symulacji sterowania samolotem bezzałogowym posłużyło do porównania różnych sposobów sterowania, tj. zarówno trybów sterowania z pojedynczym regulatorem, jak i kilku konfiguracji z różnymi sposobami przełączania. Najlepszym sposobem sterowania zarówno w ruchu symetrycznym, jak i niesymetrycznym okazało się wprowadzenie trzech przedziałów. Na podstawie opinii osób testujących stwierdzono, że taki sposób sterowania zmniejsza poziom wysiłku i zwiększa ilość czasu możliwego do wykorzystania na realizację czynności dodatkowych. Równocześnie w tej konfiguracji jest osiągnięta najwyższa jakość realizacji zadań.

5.7.2. Badanie sterowania ze zmianą poziomu wspomagania zależnie od sygnału ze sterownicy

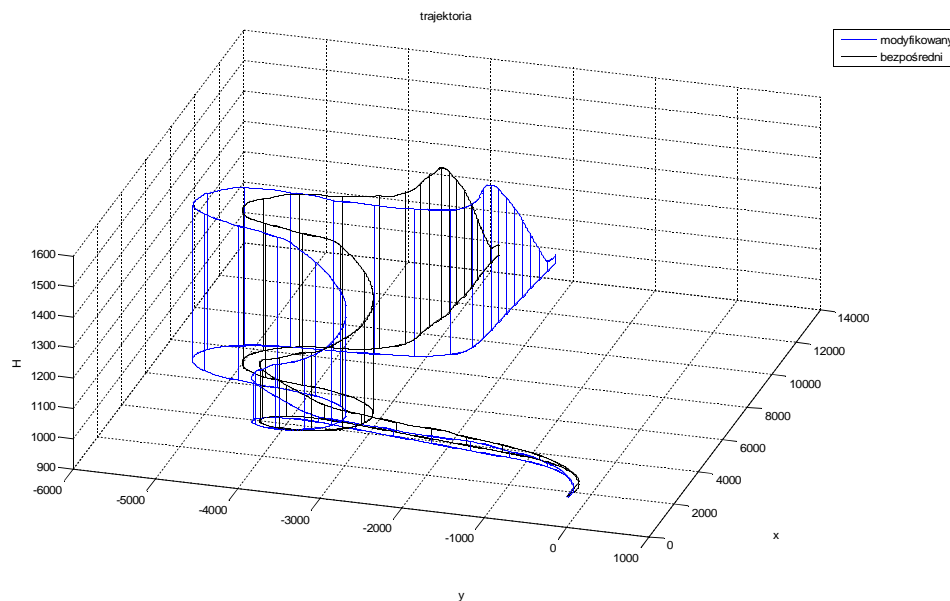
Sterowanie ze zmianą poziomu wspomagania zrealizowano w kanale sterowania lotkami oraz sprawdzono w przelocie wykonanym na stanowisku symulacyjnym. Wyróżniono następujące tryby sterowania:

- D_1 – sterowanie bezpośrednie – przeniesienie wychylenia sterownicy na lotki,
- D_2 – sterowanie prędkością kątową – aktywny regulator prędkości kątowej przechylenia,
- D_3 – stabilizacja aktualnego kąta przechylenia.

Wyniki otrzymane przy sterowaniu wspomaganym zostały oznaczone na rysunkach jako **modyfikowany**, natomiast bez wspomagania jako **bezpośredni**. Wykonano przeloty zgodnie z planem lotu:

- 0) rozpoczęcie lotu $H = 1000$, kurs 0,
- 1) $H = \text{const}$, $V = 140$, zmiana kursu na 270, czas 1 min,
- 2) orbita w lewo na wznoszeniu 5 m/s do wysokości 1500 m,
- 3) zakręt na kurs 090, lot po prostej ok. 30 s,
- 4) zakręt w lewo na kurs 360,
- 5) lot po prostej – kurs 360, $V = 110$, klapy 16,niżanie do 1000 m.

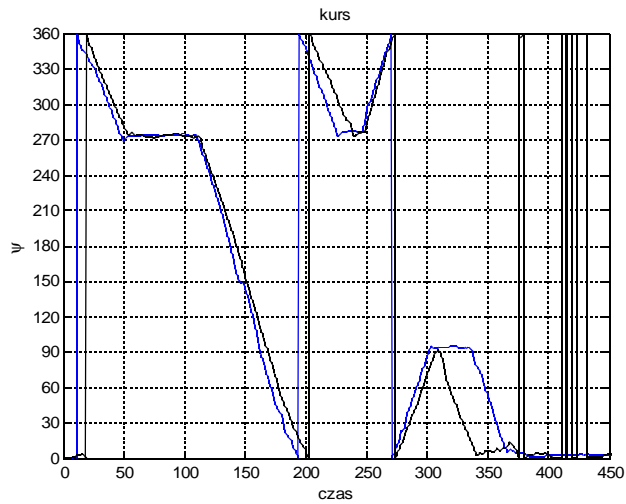
Trajektorie przelotu wynikające z zadanego planu uzyskane przez pilota samolotowego zostały zaprezentowane na rys. 5.31, natomiast na rys. 5.32 są widoczne zmiany kursu.



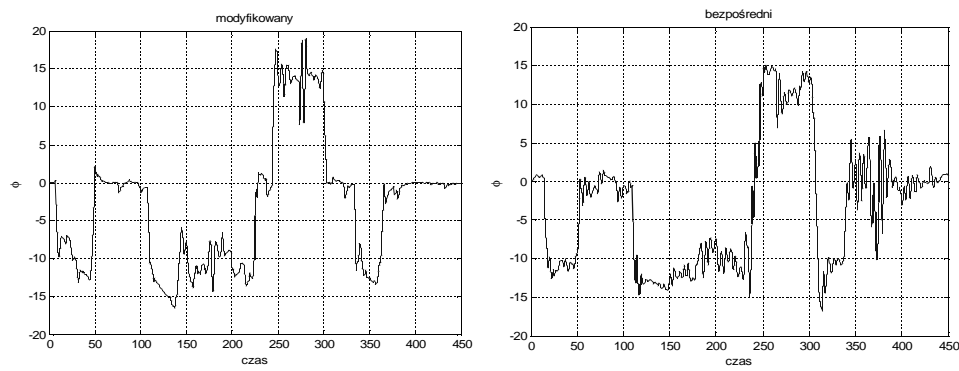
Rys. 5.31. Trajektorie dla dwóch przelotów z bezpośrednim przeniesieniem wychylenia sterownicy na sygnał sterujący oraz przy sterowaniu ze wspomaganie

Zmiany wartości kąta przechylenia (rys. 5.33) mają różny charakter. Widoczne jest, że w stanach lotu prostoliniowego system zmodyfikowany charakteryzuje się dokładniejszym utrzymywaniem wartości ustalonej. Ta właściwość, wynikająca z działania automatu stabilizującego, została zauważona przez pilota.

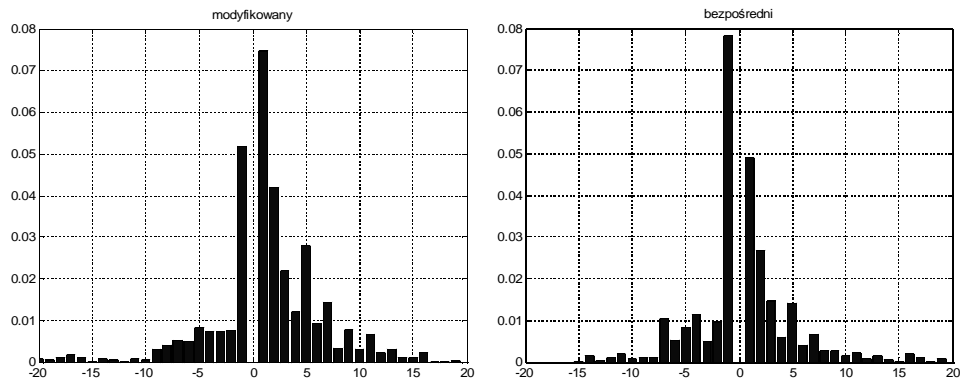
Do analizy sygnału wychylenia sterownicy zostały wykorzystane histogramy tego sygnału na odcinkach, kiedy następowały zmiany kursu (w przedziale czasu 110-300 s, rys. 5.34) oraz w czasie lotu po prostej (370-450 s, rys. 5.35), w których usunięto wartości sygnału zerowego (0,66 – modyfikowany



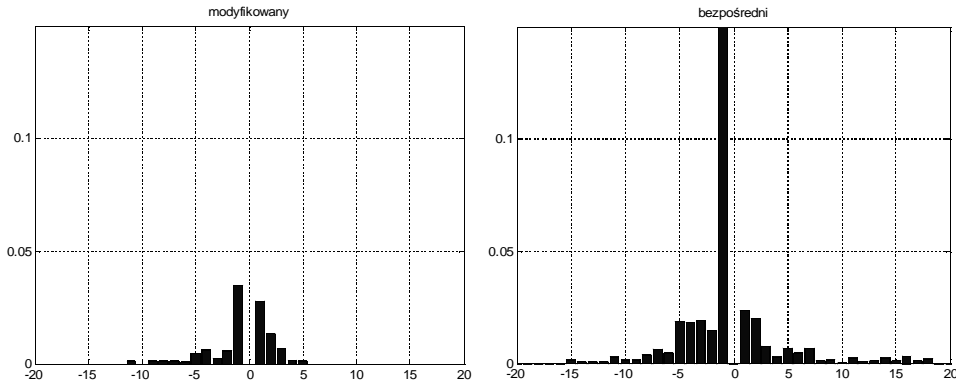
Rys. 5.32. Wartości kursu w czasie lotów testowych



Rys. 5.33. Wartości kąta przechylenia w czasie lotów testowych (sterowanie przez pilota samolotowego)



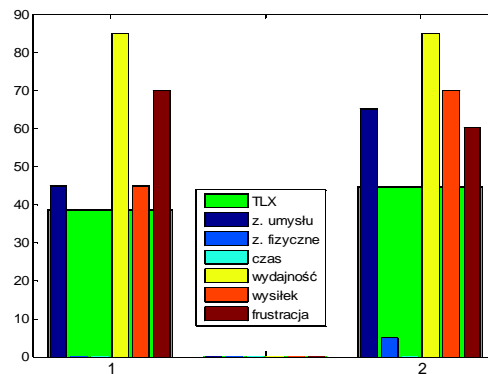
Rys. 5.34. Histogramy sygnału wychylenia sterownicy w przedziale czasu 110-300 s – zmiany kursu



Rys. 5.35. Histogramy sygnału wychylenia sterownicy w przedziale czasu 370-450 s – lot po prostej

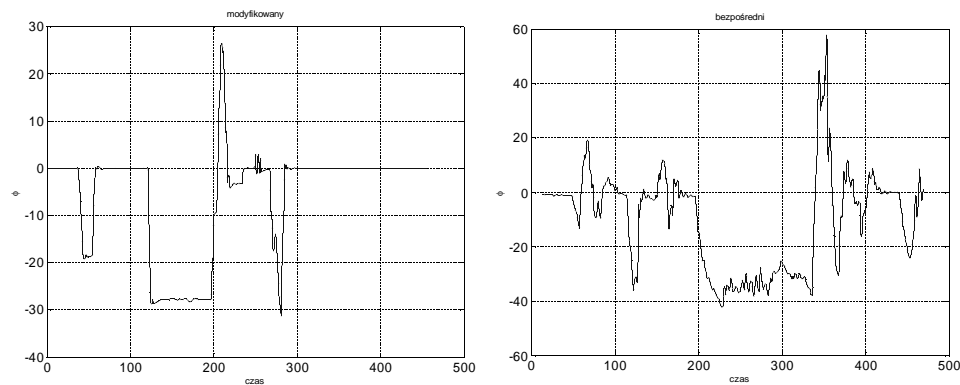
i 0,73 – bezpośredni na pierwszym odcinku oraz 0,89 – modyfikowany i 0,66 – bezpośredni na drugim odcinku). Wyniki te wskazują, że zmieniony sposób sterowania nie został przez pilota w pełni wykorzystany w fazach zmian kursu. Histogram wychyleń sterownicy ze wspomaganie wskazuje na większy poziom ruchów sterownicy niż bez wspomaganie. Widać także mniej dokładne utrzymywanie wartości kąta przechylenia. Podstawową przyczyną jest zmiana reakcji samolotu na sygnały sterujące po wprowadzeniu regulatora stabilizującego przechylenie przy zerowym sygnale wychylenia sterownicy. Ta zmiana jest niezgodna z nawykiem koniecznym do utrzymania w zakręcie samolotu sterowanego bezpośrednio przez wychylenia sterów.

Po zakończeniu każdego etapu testu przeprowadzono ankietę NASA-TLX, której wyniki zaprezentowano na rys. 5.36. Stwierdzono niewielką poprawę ogólnego wskaźnika i większości czynników składowych po wprowadzeniu modyfikacji.

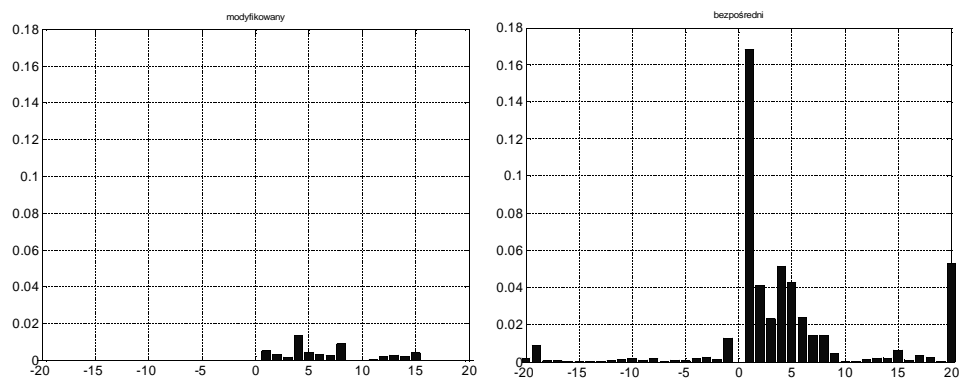


Rys. 5.36. Ocena wysiłku metodą NASA-TLX podczas realizacji przelotów przez pilota (1 – sterowanie wspomaganie, 2 – sterowanie bezpośrednie)

Inny charakter mają wyniki uzyskane przez osobę, która nigdy nie szkoliła się na pilota samolotu. Plan lotu nie został odtworzony prawidłowo. Ponieważ w lotach występują fragmenty lotów prostoliniowych i zakrętów, to porównanie tych faz obrazuje efektywność wprowadzonego sposobu sterowania. W locie ze wspomaganie widoczne jest efektywne wykorzystanie stabilizacji kąta przechylenia skutkujące dokładniejszym utrzymywaniem kąta (rys. 5.37) przy mniejszej aktywności sygnału sterującego (rys. 5.38). Usunięte wartości centralne histogramów są następujące: 0,95 przy wspomaganiu i 0,50 przy sterowaniu bezpośrednim. Wartości dla lotu po prostej: 0,98 przy wspomaganiu i 0,70 bez wspomagania, świadczą o pełnym wykorzystaniu zmienionej charakterystyki.



Rys. 5.37. Wartości kąta przechylenia w czasie lotów testowych (sterowanie przez osobę bez doświadczenia lotniczego)

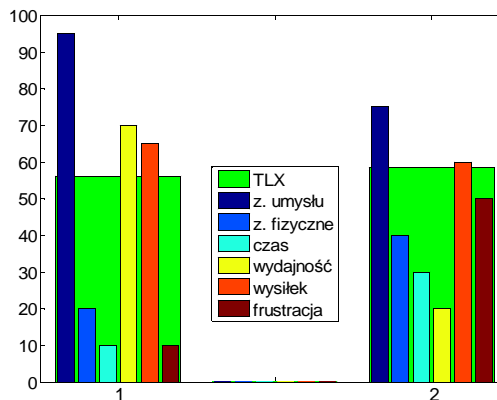


Rys. 5.38. Histogramy sygnału wychylenia sterownicy we fragmentach lotu z przechyleniem (modyfikowany 130-200 s i bezpośredni 210-340 s, sterowanie przez osobę bez doświadczenia lotniczego)

Poziom obciążenia TLX (rys. 5.39) wskazuje na nieznaczną różnicę pomiędzy rozwiązaniami, co nie jest zgodne z rzeczywistą oceną rozwiązania. Przy-

czyną było duże obciążenie mentalne oraz wysoki poziom wysiłku, wynikające z realizacji zadania ze wspomaganie jako pierwszego. Brak doświadczenia, mimo etapu zapoznawczego, spowodował działanie na poziomie wiedzy (KBB), zawierające elementy pozyskiwania wiedzy i nabywania umiejętności.

Rys. 5.39. Ocena wysiłku metodą NASA-TLX podczas realizacji przelotów przez osobę bez doświadczenia lotniczego (1 – sterowanie wspomagane, 2 – sterowanie bezpośrednie)



Wyniki badań świadczą o korzyści ze zmiany modelu efektywnego po wprowadzeniu sterowania ze zmianą trybów, lecz także potwierdzają, że do pełnego wykorzystania zmienionych charakterystyk konieczna jest zmiana nawyków u osób z doświadczeniem.

5.7.3. Sterowanie zespołem napędowym za pomocą jednej dźwigni z wykorzystaniem zmiany trybów

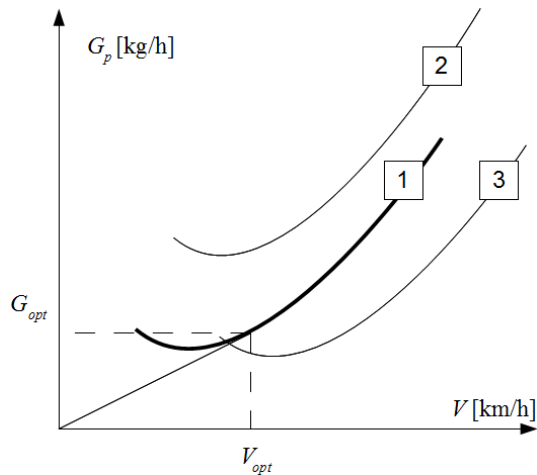
Możliwość sterowania zespołem napędowym za pomocą jednej dźwigni redukuje obciążenie zadaniowe pilota. Dalsze rozważania będą dotyczyły tłokowego zespołu napędowego ze śmigłem przestawialnym. Prawidłowe sterowanie zespołem napędowym z wykorzystaniem przepustnicy, nastaw składu mieszanki paliwowo-powietrznej oraz nastaw łopat śmigła jest jedną z ważniejszych czynności obciążających pilota w samolocie z niezautomatyzowanym zespołem napędowym.

Pilot, mając do dyspozycji kilka elementów regulacyjnych, może uzyskać różne stany pracy zespołu napędowego. Z charakterystyk silnika oraz śmigła wynikają obroty, przy których zespół napędowy osiąga najwyższą sprawność [102, 209]. Efektywne wykorzystanie jednej dźwigni, które zmienia model efektywny zespołu napędowego [327], musi uwzględnić sposób pracy zespołu napędowego w zależności od stanu lotu [24]:

- 1) normalny przelot – gdy wskazana jest minimalizacja zużycia paliwa i ograniczenie emisji związków szkodliwych w spalinach,
- 2) wykorzystanie pełnych możliwości zespołu napędowego – gdy zapewnienie maksymalnej mocy jest krytyczne dla bezpieczeństwa lotu,

3) pracę na małych obrotach – gdy warunkiem nieprzerwanej pracy jest wzbogacenie mieszanki.

We współczesnych układach automatycznie sterujących zespołem napędowym do ustawiania trybu ekonomicznego bądź pełnej mocy służy dodatkowy przełącznik [223]. Sterowanie zespołem napędowym z uwzględnieniem charakterystyk samolotu i integracja z systemem sterowania lotem umożliwiają dalszą redukcję zużycia paliwa. Z charakterystyk godzinowego zużycia paliwa (typowe przebiegi przedstawione na rys. 5.40 ilustrują dodatkowo wpływ zwiększenia masy 2, zwiększenia wysokości lotu 3 w odniesieniu do charakterystyki 1) wynika optymalna prędkość przelotu V_{opt} .



Rys. 5.40. Wyznaczanie G_{opt} na charakterystyce godzinowego zużycia paliwa; 1-3 – objaśnienia w tekście

Tabela 5.5. Działanie sterownika zespołu napędowego z jedną dźwignią

Strefa wychylenia	Warstwa znaczeniowa	Warstwa sygnałowa
0	bieg jałowy	$\beta = \beta_{min}$, $\alpha_p = \alpha_{pmin}$, G_p optymalne, w zależności od stanu (rozruch, zimny/gorący silnik itd.)
1	wykorzystanie zespołu napędowego do hamowania w locie	$\beta = \beta_{zad}$, $\alpha_p = \alpha_{pmin}$, G_p optymalne ze względu na warunki pracy zespołu napędowego
	mały gaz na Ziemi	$\beta = \beta_{min}$, $\alpha_p = \alpha_{pmin}$, G_p zależne od stanu
2	przelot	$\beta = \beta_{opt}$, $\alpha_p = \alpha_{pzad}$, G_p optymalne
	manewrowanie na Ziemi	$\beta = \beta_{opt}$, $\alpha_p = \alpha_{pzad}$, G_p zależne od stanu
2a	przelot (wyróżnione położenie)	$\beta = \beta_{opt}$, $V = V_{opt}$, G_p optymalnie ze względu na zużycie paliwa
3	wysterowanie ekstremalne	$\beta = \beta_{max}$, $\alpha_p = \alpha_{pzad}$, G_p ekstremalne ze względu na moc
3a	moc krótkotrwała	$\beta = \beta_{max}$, $\alpha_p = \alpha_{pmax}$, G_p ekstremalne ze względu na moc

Wprowadzenie warstwy znaczeniowej dla wychyleń dźwigni sterującej prowadzi do wyróżnienia kilku stref i charakterystycznych położań zaprezentowanych w tab. 5.5. Sposób sterowania zespołem napędowym został opisany za pomocą kąta nastawienia łopat śmigła β , nastawienia przepustnicy α_p oraz godzinowego zużycia paliwa G_p .

Strefy, na jakie jest podzielone wychylenie, mogą zostać określone jako przedziały lub zbiory rozmyte. Rozmyta granica pomiędzy strefami 2. i 3. pozwala na uzyskanie stanów pośrednich pomiędzy sterowaniem optymalnym i ekstremalnym. Jednoznaczne rozróżnienie granic niektórych stref jest konieczne do prawidłowej świadomości sytuacyjnej pilota i osiągnięte przez zwiększenie siły oporu na granicy stref (położenie 2a) lub zdjęcie blokady ruchu dźwigni (przy ruchu 3-3a).

6. AKTYWNE ORGANA STEROWE

6.1. Rola aktywnych organów sterowych w procesie sterowania

Aktywne elementy sterowe, przez które człowiek przekazuje swoje decyzje i wartości sterujące, różnią się od pasywnych tym, że reakcja tych elementów jest pewną informacją zwrotną od układu sterowanego. Z modelu OOD²A wynika możliwość wspomagania człowieka przez wprowadzenie informacji w formie siły reakcji sterowanej przez system. W tabeli 6.1 zostały wyszczególnione możliwe do uzyskania efekty wynikające z siły reakcji organu sterowego, przypisane odpowiednio do etapów przetwarzania informacji przez człowieka.

Tabela 6.1. Możliwe znaczenie siły reakcji organu sterowego

Etapy przetwarzania informacji	Pasywne	Aktywne
Odbiór informacji	poziom sterowania	siła przeciwdziałająca może przekazywać różne informacje
Analiza informacji	-	reakcja może wynikać z analizy stanu
Generowanie możliwości	-	reakcja prowadzi do sterowania, które sugeruje system wspomagający
Podejmowanie decyzji	-	możliwość przeciążenia lub akceptacji sposobu sterowania wynikającego z działającej siły reakcji
Działanie	zadawana wartość sygnału sterującego ^x	możliwe zarówno zadawanie sygnału sterującego, jak i pozostawienie tej funkcji systemowi sterowania

^x – jak zaprezentowano w pkt 5.7, wartość zadawana może mieć szersze znaczenie niż wartość sygnału sterującego.

Pewne elementy przekazu dodatkowych informacji, wprowadzane w lotnictwie w klasycznym mechanicznym przeniesieniu napędu sterów, są stosowane do tej pory [88, 140]. Należą do nich:

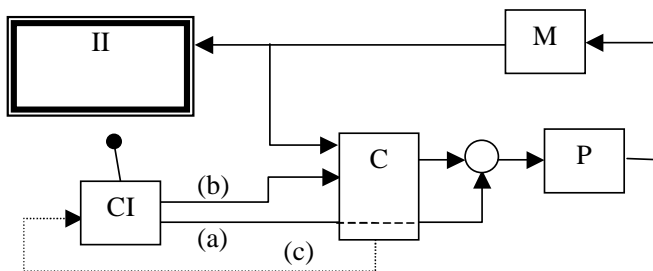
- generowanie siły przeciwdziałającej (*stick pusher*),
- wprowadzenie siły periodycznej (*stick shaker*),
- dodatkowe sprężyny: jednokierunkowa (zwykle powodująca ruch steru wysokości od pilota), dwukierunkowa (zmniejszająca efekt histerezy),

- układy wprowadzające dodatkowe siły: siły od przyspieszeń przez wprowadzenie masy, siły wynikające z ciśnienia dynamicznego z zastosowaniem puszek ciśnieniowej.

Dwa pierwsze rozwiązania są częścią systemu ostrzegania, pozostałe służą do kształtowania charakterystyki reakcji.

Szersze spojrzenie na proces sterowania samolotem uwzględnia fakt wykonywania przez pilota czynności związanych z koniecznością realizacji wielu zadań równocześnie. W samym sterowaniu można wyróżnić utrzymywanie wartości zadanych lub nadszanie za zmianami wartości zadanych kilku parametrów. Dodatkowo pilot może prowadzić komunikację radiową i obsługiwać aparaturę pokładową. Ważnym zadaniem pilota jest monitorowanie stanu samolotu, stanu otoczenia i stanu aparatury zainstalowanej na pokładzie. Zastosowanie aktywnych organów sterowych z zakresu monitorowania stanu umożliwi znaczącą poprawę właściwości samolotu. Aktywne organa sterowe mogą być szczególnie przydatne jako elementy przekazujące sygnały ostrzegające bądź sygnały wskazujące właściwą reakcję w danej sytuacji.

Jak już wcześniej wspomniano, zaproponowany sposób współdziałania jest oparty na koncepcji dialogu, przy czym przyjęto hierarchiczną strukturę z nadrzędną rolą pilota i pomocniczą rolą systemu sterowania. Ogólną strukturę, w której są umieszczane aktywne organa sterowe, ilustruje rys. 6.1.



Rys. 6.1. Schemat układu sterowania z aktywnym organem sterowym; II – interfejs informacyjny, C – sterownik, CI – organy sterowe, M – układy pomiarowe, P – proces sterowany (na podstawie pracy [210])

Włączenie aktywnych organów sterowych odbywa się przez sygnały sterujące (a) i (b) oraz sygnał sprzężenia zwrotnego (c). Sygnały sterujące mogą być przenoszone bezpośrednio (a) lub jako sygnał kształtujący sterowanie procesem (b). Sygnał ten może także określać wartości zadane sterowników i tryb pracy systemu zgodnie z koncepcją opisaną w pkt 5.7. Należy jeszcze wspomnieć, że koncepcja aktywnych organów sterowych jest metodą rozwiązania niedogodności pojawiających się przy zastosowaniu układów sterowania pośredniego z pasywnymi organami. Doświadczenia Katedry Awioniki i Sterowania Politechniki

Rzeszowskiej zdobyte podczas realizacji badań z tego zakresu [279, 280, 282, 287] wskazują na możliwości uproszczenia sterowania samolotem. Równocześnie przeprowadzone próby w locie pokazały braki związane z wykorzystywaniem pasywnych organów sterowych, wynikające z braku sprzężenia siłowego oraz zmiany zachowania się samolotu w efekcie wprowadzenia układu pośredniego sterowania.

Wyniki te są zbieżne z badaniami światowymi. Wprowadzenie sterownic bocznych, które nie są mechanicznie połączone z elementami sterowanymi, zmieniło sposób odczuwania zachowania samolotu. Poważnym mankamentem okazał się brak informacji zwrotnej o siłach występujących na elementach sterowanych, dlatego prowadzone są prace nad różnego rodzaju sterownicami z siłowym sprzężeniem zwrotnym [35, 57, 68, 103, 118, 171, 312].

Z przeprowadzonych badań sterownic wynika, że zastosowanie sterownicy aktywnej, w porównaniu z pasywną, poprawia jakość sterowania [118], może być wykorzystane jako dodatkowy kanał informacyjny w stanach dużego obciążenia kanału wzrokowego [31], umożliwia przekazanie informacji o anomaliach, np. opóźnieniach sygnału wychylenia steru (*smart-cue*) [140], oraz ostrzeżeniach przekroczeń wartości granicznych stanu, obciążeniach konstrukcji, zbliżaniu do powierzchni Ziemi [68]. Sterownice aktywne w SKL proponuje się wykorzystać do przekazu informacji o przeszkodach, przez uformowanie pola wokół aparatu. Pojawienie się przeszkody w tym polu skutkuje powstaniem siły odpychającej, zgodnie z wartością tego pola [27, 151, 152]. Stwierdzona została także możliwość zmniejszenia wysiłku obserwatora przy sterowaniu kamerą, dzięki wspomaganiamu przez sprzężenie siłowe [144]. Sprzężenie siłowe może także przekazywać informację o odchyleniu od stanu optymalnego [39]. Przy określaniu charakterystyk reakcji dostosowanych do właściwości człowieka stosuje się metody uczenia, np. charakterystyki reakcji kierownicy i pedału przyspieszenia uzyskano metodą Q-learningu [91], charakterystyki manipulatora koparki przez uczenie sieci neuronowej [1].

6.2. Przykładowa konstrukcja aktywnych organów sterowych

6.2.1. Założenia i wstępna analiza właściwości

W ramach projektu [221] zostały opracowane aktywne organa sterowe:

- DS – dźwignia sterownicy dwuosiowej,
- DZN – dźwignia sterująca zespołem napędowym.

Podczas projektowania tych urządzeń uwzględniano możliwość przeniesienia głównej koncepcji rozwiązania (po ewentualnej zmianie technologii, elementów bądź modyfikacji układu kinematycznego) do urządzeń, które nadawałyby się do instalacji na pokładzie samolotu. Przyjęto, że rozwiązania mają być wykorzystywane w samolotach lekkich. Wiąże się to z ograniczeniem wymiarów oraz ograniczeniem do niezbędnego minimum poboru energii. W wersji laboratoryj-

nej wykonanej tak, aby umożliwić realizację różnych konfiguracji, nie minimalizowano wymiarów (rys. C12, dodatek C). Przyjęto wykorzystanie elektrycznych elementów wykonawczych, tj. silnika prądu stałego (DZN) i silników krokowych (DS).

Wartość siły reakcji aktywnego organu sterowego jest wynikiem działania układu nadrzędnego. Należy jednak pamiętać, że ze względów ergonomicznych jest konieczne, aby reakcja organów sterowych pojawiała się w wyniku zmian położenia (dotyczy DS) jako informacja zwrotna oraz przeciwdziałała ruchowi niezależnie od położenia (dotyczy DZN). Wymienione charakterystyki siły można uzyskać przez wykorzystanie elementów pasywnych. W celu ograniczenia zużycia energii przyjęto, że będą poszukiwane rozwiązania łączące elementy pasywne i aktywne.

Układ wymuszający siłę reakcji musi uwzględniać różnice w sposobie wykorzystywania organu sterowego. Różnice dotyczące dźwigni aktywnej sterującej zespołem napędowym (DZN) oraz dźwigni sterownicy (DS) ilustruje następująca analiza:

- wykorzystanie siły o charakterystyce siły tarcia (w DZN pożądana, w DS należy ją ograniczyć),
- wykorzystanie siły zmieniającej się monotonicznie wraz z wychyleniem (w DS pożądana, w DZN tylko jako efekt działania rozkazów z układu nadrzędnego),
- wymagana szybkość zmiany wartości siły (w DS zależność od wychylenia wymusza szybkie reakcje, w DZN duża szybkość nie jest wymagana, także ze względu na charakterystyki obiektu, który jest sterowany przez sygnał z dźwigni),
- zakres wartości sił (w każdym przypadku zakres ten wynika z czynników ergonomicznych i zależy od tego, jakie części ciała i w jakim układzie wykorzystuje człowiek podczas pracy z danym elementem),
- maksymalna szybkość ruchu (ze względu na właściwości procesów dynamicznych, które są sterowane za pomocą sygnałów wyjściowych z organów sterowych oraz ze względu na bezpieczeństwo człowieka prędkość w ruchu swobodnym – bez przeciwdziałania ze strony człowieka – musi być ograniczona),
- zakres przemieszczeń (musi być dostosowany do zakresu ruchu części ciała, którą wykorzystuje człowiek podczas pracy z danym elementem),
- rodzaj przemieszczenia (przesunięcie, obrót i ruch złożony) oraz liczba stopni swobody (DZN – typowo jeden stopień swobody, DS – typowo dwa stopnie swobody).

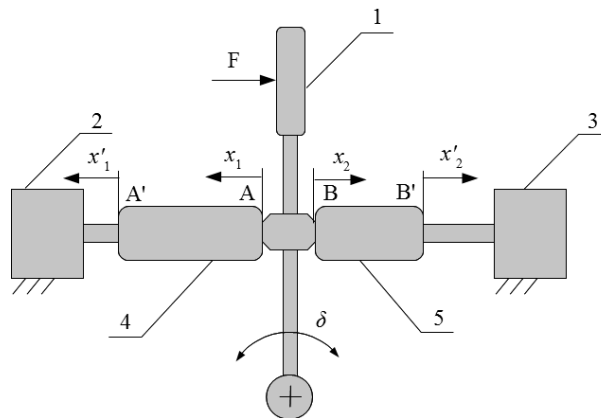
Ruch organu sterowego jest efektem sumowania siły wymuszanej przez człowieka i siły reakcji tego organu. Zakłada się przy tym, że człowiek w każdej sytuacji jest w stanie działać większą siłą niż reakcja organu – czyli ma możliwość sterować zgodnie z własną wolą, niezależnie od przeciwdziałania. W przypadku braku przeciwdziałania sterowanie jest zgodne z zadaniem przez sterow-

nik nadrzędny. Z tych założeń wynikają wymagania dla lokalnego sterownika organu sterowego, dotyczące poprawnej pracy zarówno przy dużych siłach zgodnych, jak i przeciwdziałających ruchowi. Szczegółowe wymagania „poprawnej pracy” należy sprecyzować dla każdego przyjętego rozwiązania, biorąc także pod uwagę typowe wymagania teorii sterowania, takie jak stabilność i jakość sterowania. W obydwu rozwiązaniach przyjęto założenie, że przy braku zasilania układu sterującego siłami elementy te będą się zachowywać co najmniej w sposób umożliwiający bezpieczne sterowanie.

6.2.2. Aktywna sterownica z nieliniowymi elementami sprężystymi

Przy kształtowaniu siły reakcji rozróżnia się sterowanie siłą i sterowanie charakterystyką siły reakcji [154]. Opisane rozwiązanie dotyczy sterowania charakterystyką siły reakcji zrealizowanego przez wykorzystanie nieliniowych elementów sprężystych. Sterowanie napięciem sprężyn powoduje zmiany charakterystyki zależności siły reakcji od wychylenia sterownicy. W tym rozwiązaniu sygnałem zwrotnym jest więc nie tyle wartość chwilowa siły, co raczej charakterystyka, jaką zadaje sterownik.

Na rysunku 6.2 zaprezentowano schemat idei realizacji układu wymuszającego siłę reakcji. Siłowniki elektryczne nr 2 i 3 przemieszczają punkty A' i B' nieliniowych elementów sprężystych nr 4 i 5. Na rysunku 6.3 przedstawione zostały charakterystyki dwóch przykładowych sprężyn. Siły reakcji sprężyn zależą zarówno od przemieszczenia punktów A' i B', jak i wywołanego ruchem dźwigni nr 1 przemieszczenia punktów A i B.



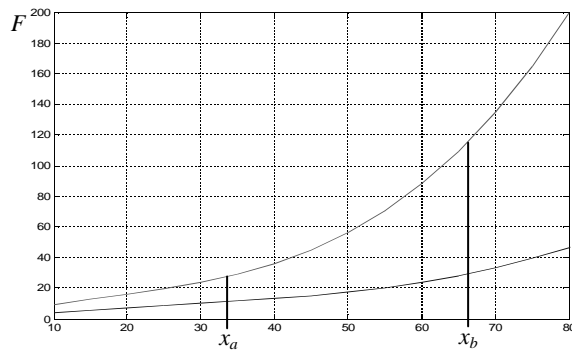
Rys. 6.2. Schemat układu formującego charakterystykę sił w sterownicy; 1-5 – objaśnienia w tekście

Równe wartości przesunięć $x'_1 = x'_2$ powodują, że położenie neutralne dźwigni (położenie odpowiadające zerowej sile zewnętrznej przyłożonej do dźwigni) jest położeniem centralnym. Równocześnie jednak, w zależności od wartości tych przemieszczeń zmienia się punkt pracy, w którym znajduje się element

sprężysty, a w efekcie dla różnych wartości przemieszczenia (wartości przykładowe zaznaczone na rys. 6.3) różna jest sztywność odczuwana na drążku:

$$\frac{dF}{dx}(x_a) < \frac{dF}{dx}(x_b) \quad (6.1)$$

Z zależności (6.1) wynika, że zakres możliwych do uzyskania charakterystyk sztywności dźwigni zależy od kształtu charakterystyki elementu nieliniowego. Wprowadzenie nierównych przemieszczeń $x'_1 \neq x'_2$ powoduje dodatkowo zmianę położenia neutralnego dźwigni. Ten efekt jest korzystny przy sterowaniu w kanale pochylania, pozwalając na uzyskanie charakterystyki pośredniego układu sterowania podobnej do charakterystyki klasycznego układu sterowania.



Rys. 6.3. Charakterystyki dwóch sprężyn (zależność siły reakcji wyrażonej w niutonach od ugięcia w procentach długości swobodnej sprężyny)

Dzięki zastosowaniu układu, w którym sterowanie polega na zmianach położenia jednego końca elementu sprężystego, konieczność działania elementów wymuszających została ograniczona do nielicznych sytuacji, w których asystent pilota, zmieniając charakterystykę, przekazuje określony sygnał o charakterze ostrzeżenia. To rozwiązanie znakomicie redukuje zużycie energii w porównaniu z rozwiązaniami, w których siła jest generowana bezpośrednio przez siłowniki, a równocześnie umożliwia kontynuowanie wykorzystania sterownicy przy braku zasilania siłowników (oczywiście konieczne jest podtrzymanie zasilania części pomiarowej, do czego należy wykorzystać niezależną magistralę zasilającą). Przerwa w działaniu siłowników spowoduje utrudnienie sterowania, typowe po awarii układów automatyki wspomagających pilota. Będzie to dotyczyło jedynie funkcji wspomagania, bez przerwania możliwości kontynuowania lotu.

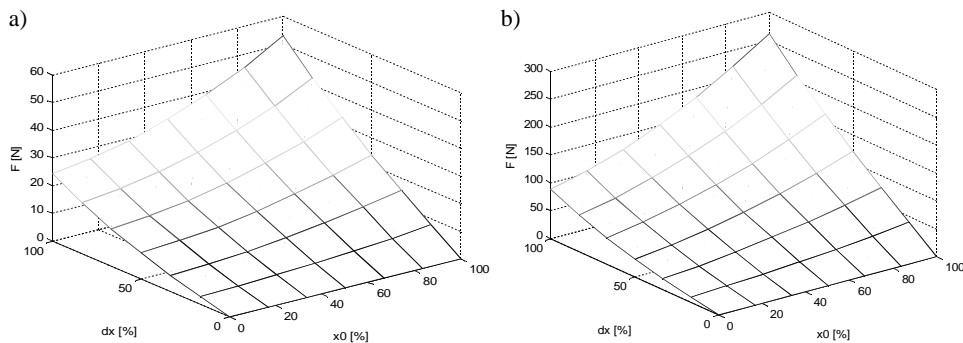
W opisywanym rozwiązaniu istnieje możliwość uzyskania różnych charakterystyk, kosztem wymagań nałożonych na moc zasilania. Niezbędna moc zasilania, wynikająca z podstawowej zależności wymaganej siły i szybkości ruchu:

$$P_{\max} = \max(F \cdot v) \quad (6.2)$$

zależy od aktualnej siły reakcji i wymaganej szybkości zmian siły reakcji:

$$P_{\max} = \max \left(F \cdot \frac{dF}{dt} \cdot \left(\frac{dF}{dx} \right)^{-1} \right) \quad (6.3)$$

Z ograniczenia poboru energii wynika ograniczenie szybkości zmiany siły jako efektu sterowania. Osiągane wartości sił reakcji pozostają zależne od ugięcia sprężyn. Wykorzystując charakterystyki sprężyn (rys. 6.3), wyliczono wartości sił reakcji sterownicy (w punkcie kontaktu z dźwignią) i przedstawiono charakterystyki siły reakcji zależnie od wychylenia sprężyn dx (rys. 6.4). Sprężyny o charakterystyce nr 1 pozwalają na uzyskanie, dla maksymalnych wychyleń, sił z zakresu 24-54 N, zależnie od wstępnego napięcia x_0 . Drugi rodzaj sprężyn umożliwia uzyskanie większej zmienności charakterystyk i większej wartości sił.



Rys. 6.4. Charakterystyka sterownicy: a) ze sprężyną nr 1, b) ze sprężyną nr 2 (wartości sterujące wyrażone w % zakresu każdego sygnału)

Możliwość zadania charakterystyki sterownicy pozwala na wykorzystanie tego elementu do sprawdzenia, jak jego sztywność wpływa na sterowanie przez człowieka. Wykonane wstępne testy, podczas których zbierano opinie o wygodzie sterowania przy różnych charakterystykach, posłużyły do doboru odpowiedniej sztywności nominalnej. Okazało się, że dla charakterystyki nr 1 wartości sił, dla małych wartości wstępnego napięcia, są zbyt małe. Utrudnia to sterowanie, co jest zgodne z wnioskami analizy dotyczącej sił reakcji jako informacji o wychyleniu. Wartości sił reakcji dla charakterystyki nr 2 w zakresie małych wartości napięcia wstępnego są odpowiednie celem sterowania. Wartości maksymalne wymagają dużego wysiłku, celem utrzymania sterownicy w położeniach skrajnych. Ponieważ duża siła uniemożliwia precyzję sterowania, a równocześnie działa zniechęcająco, zwiększenie siły reakcji dźwigni z tymi sprężynami będzie stanowić informację zwrotną układu nadzorującego o niepoprawnym sterowaniu. Akceptacja sugestii przekazywanej przez tę informację powin-

na spowodować przestawienie dźwigni w położenie, dla którego sygnały sterujące utrzymują samolot w zakresie stanów bezpiecznych. Sygnały sterujące aktywną sterownicą w każdym kanale to wartości odpowiadające zadawanej charakterystyce sztywności (oznaczenie F_0) oraz zadawanemu położeniu neutralnemu (oznaczenie dF , gdyż wynika z różnicy charakterystyki sił).

6.2.3. Aktywna dźwignia sterująca zespołem napędowym

Sposób działania aktywnej dźwigni sterującej zespołem napędowym musi wynikać ze sposobu jej wykorzystania przez system wspomagający działania pilota. Odmienne niż w przypadku DS, siła reakcji klasycznej dźwigni nie stanowi sygnału zwrotnego. Zapewnienie odpowiednio dużej siły przeciwdziałającej ruchowi jest konieczne, aby uniemożliwić niezamierzone przemieszczanie tego elementu zarówno w efekcie przeciążeń w ruchu samolotu i drgań konstrukcji, jak i w efekcie niezamierzonych ruchów ręki pilota. Stąd wynika możliwość wprowadzenia siły reakcji jako sygnału zwrotnego przekazywanego przez system oceniający poprawność sterowania.

Aktywna dźwignia sterująca zespołem napędowym umożliwia także współpracę z człowiekiem układów automatycznego sterowania (*auto-throttle*), z zachowaniem świadomości sytuacyjnej.

DZN zawiera dwa elementy, które łącznie kształtują charakterystykę siły (na rękojeści), zgodnie z zależnością:

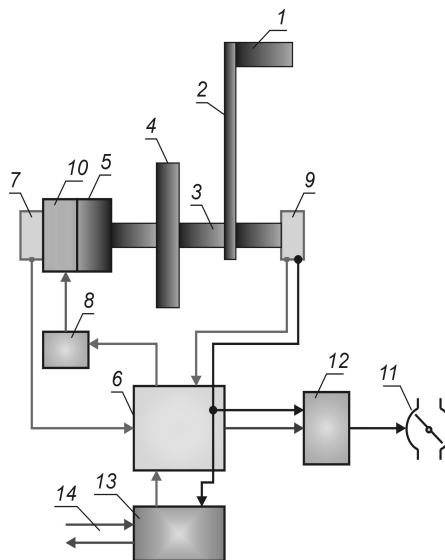
$$F = F_t(\delta) + F_s(\delta, X) \quad (6.4)$$

gdzie wyróżniono składnik siły tarcia F_t oraz składnik siły kształtowanej aktywnie F_s . Oznaczono wielkości: δ – wychylenie dźwigni oraz X – stan samolotu, jako podstawowe wielkości wpływające na te siły. Należy jednak zaznaczyć, że zależność (6.4) ilustruje jedynie zagadnienie opisane szerzej w dalszej części pracy. Element realizujący siłę tarcia – hamulec, zapewnia przy braku zasilania siłownika charakterystykę klasycznej pasywnej dźwigni.

DZN, lub ogólnie aktywna dźwignia sterująca o omawianych charakterystykach, ilustruje wykorzystanie pełnej koncepcji dialogu pomiędzy systemami wspomagającymi a pilotem (ogólnie człowiekiem operatorem). Zastosowana koncepcja sterowania ręcznego z nadzorem układów automatyki polega na wykorzystaniu siły jako źródła informacji o poprawności sterowania. Wzrost siły przeciwdziałającej ruchowi dźwigni realizowanemu przez pilota (ogólnie – operatora) wymusza na nim ocenę swojego działania i, w przypadku chęci kontynuowania tego działania, świadome przewyciężenie siły. Równocześnie układ wymuszający opór na podstawie wartości aktualnego wymuszenia odbiera informację o zamiarach operatora. Kontynuowanie przez operatora sterowania rozbieżnego z algorytmem automatyki może spowodować przełączenie układu

sterowania na inny tryb pracy, w którym nastąpi uzgodnienie sterowania z intencjami operatora.

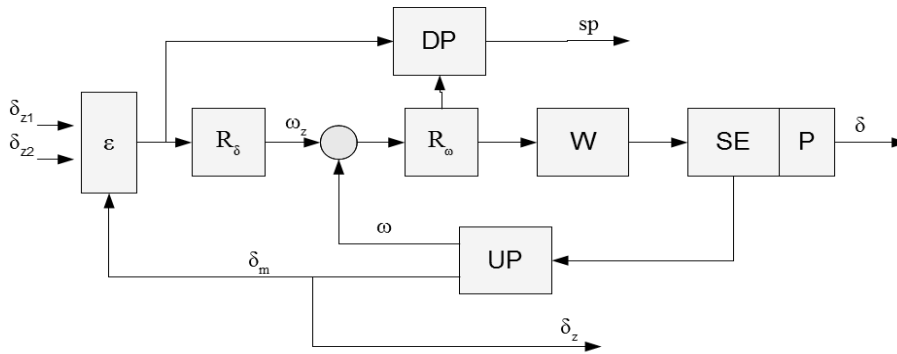
Schemat idei dźwigni sterowania lotniczym zespołem napędowym zaprezentowano na rys. 6.5.



Rys. 6.5. Schemat struktury aktywnej dźwigni sterowania lotniczym zespołem napędowym; 1-14 – objaśnienia w tekście

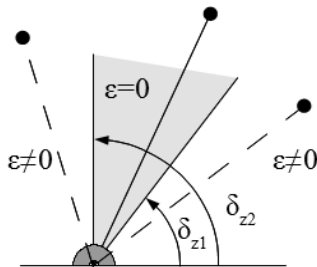
Dźwignia składa się z rękkości 1 i ramienia 2 połączonego wałkiem 3 z hamulcem 4 i przekładnią redukcyjną 5. Hamulec 4 wytwarza stały (ustawiany) moment oporowy. Przekładnia przenosi moment napędowy silnika 10. Silnik 10 jest sterowany sterownikiem 6 (strukturę sterownika ilustruje rys. 6.6), z wykorzystaniem układu pomiarowego 7 i stopnia mocy 8. Układ pomiarowy dostarcza informacji o położeniu i prędkości kątowej wału silnika. Dodatkowy układ pomiarowy 9 mierzy aktualne położenie dźwigni, wykorzystywane w algorytmie sterującym, oraz stanowi informację o wartości zadanej dla sterownika zespołu napędowego 13 (alternatywnie sygnał zadawany może być przesyłany z systemu sterowania łączem danych 14). Na rysunku 6.5 zaznaczono przepustnicę 11, sterowaną przez serwomechanizm 12. Oczywiście zaprezentowane rozwiązanie nadaje się także do wykorzystania przy bezpośrednim przeniesieniu wychylenia dźwigni na ruch przepustnicy.

W odróżnieniu od klasycznego sposobu działania sterownik dźwigni powinien uznać za poprawne wartości należące do pewnego przedziału. Przedział ten to ogólnie zakres poprawnych wartości wysterowania zespołu napędowego w danym stanie lotu samolotu. Przedział wartości (δ_{z1} , δ_{z2}) jest przesyłany do sterownika dźwigni z układu nadrzędnego (tutaj będzie to elektroniczny asystent pilota).



Rys. 6.6. Struktura sterownika aktywnej dźwigni; objaśnienia symboli w tekście

Sposób działania zmodyfikowanego regulatora dla $\delta_{z1} = \delta_{z2}$ polega na nadaniu za wartością zadaną jak w rozwiązaniach klasycznych, gdy natomiast $\delta_{z1} \neq \delta_{z2}$, to wartość uchybu jest określana zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 6.7. Wartość wychylenia w przedziale $(\delta_{z1}, \delta_{z2})$, dająca zerowy uchyb, nie powoduje reakcji regulatora, czyli pomiędzy tymi wartościami każdy kąt wychylenia dźwigni jest przez układ traktowany jako prawidłowy. Wyjście poza przedział spowoduje zadziałanie regulatora i w efekcie próbę przestawienia dźwigni. Ponieważ działanie sterownika niekoniecznie musi zostać zaakceptowane, to sterownik dźwigni jest wyposażony w detektor przeciążenia. Algorytm sterujący wykorzystuje tę informację, zmieniając sposób działania. Zadaniem detektora DP jest stwierdzenie faktu niezgodności położenia zadanego, będącego wyrazem woli człowieka operatora, z położeniem aktualnym. Ten element uczestniczy zatem w ocenie zamiarów pilota, będąc częścią asystenta, któremu poświęcono rozdz. 7.



Rys. 6.7. Sposób wyznaczania uchybu dla regulatora dźwigni

Sterownik dźwigni składa się z dwóch regulatorów stanowiących serwo-mechanizm pozycyjny. Regulator R_ω steruje prędkością obrotową silnika (SE) na podstawie informacji o aktualnej prędkości ω i prędkości zadanej ω_z . Regulator R_δ steruje kątem wychylenia dźwigni zgodnie z przedstawionym opisem (element ε wylicza wartość uchybu). W przypadku wykrycia przeciążenia silnika sterownik próbuje temu przeciwdziałać, przy czym siła reakcji jest określona

przez system nadrzędny (asystenta). Wartości aktualnych kąta i prędkości kąto-
wej dostarczają układy pomiarowe (UP).

Sygnaly sterujące aktywną dźwignią sterującą zespołu napędowego to war-
tość maksymalnego poprawnego występowania (oznaczona T_g), wartość mini-
malna (oznaczona T_d) oraz wartość określająca maksymalną siłę przeciwdziałają-
cą (U_{\max}).

6.2.4. Wpływ charakterystyki siły sterownicy na działanie człowieka

Wyniki badań wskazują na wpływ charakterystyki sterownicy na parametry
modelu postaci (3.23), jakie uzyskuje w efekcie adaptacji [178]. Aktywne orga-
ny sterowe umożliwiają zmiany sił i charakterystyk sił reakcji. Analiza zmian
charakterystyki zostanie przeprowadzona z wykorzystaniem ogólnych modeli
elementów systemu.

Niech ogólny model układu sterowania z pilotem będzie przedstawiony
równaniami opisującymi obiekt:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, z) \\ y &= g(x) \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

efekty reakcji sterownicy:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_c &= f_c(x_c, u, x) \\ F &= g_c(x_c, u) \end{aligned} \right\} \quad (6.6)$$

oraz działania człowieka jako sterownika:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_h &= f_h(x_h, y, F) \\ u &= g_h(x_h, y, y_d) \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

Ogólna postać modelu obiektu (wzór (6.5)) niewiele mówi o jego zachowa-
niu poza tym, że przyjęto sygnały wyjściowe zależne jedynie od stanu, czyli
pomiar wybranych zmiennych stanu lub ich funkcyjnych kombinacji. Dodatko-
wo założono, że obiekt sterowany, w pewnym zbiorze obejmującym stany,
w których realizowane są typowe loty, jest stabilny lokalnie.

Model działania człowieka jest najmniej sprecyzowanym opisem. W zasa-
dzie pokazuje tylko, że człowiek w procesie sterowania wykorzystuje otrzyma-
ne informacje o stanie y , wewnętrzne zmienne stanu x_h oraz cel sterowania,
który opisują zmienne y_d pobierane z otoczenia lub generowane w umyśle. Do-
datkowo na ten proces może w pewien sposób wpływać siła oddziaływania ste-
rownicy F .

Porównując proces sterowania przez człowieka z układami sterowania, można wydzielić trzy składniki sterowania jako bezpośrednią reakcję zależną od wartości zadanej y_d , składnik zależny jedynie od wartości aktualnej, czyli y oraz najważniejszy w teorii regulacji składnik zależny od uchybu: $\varepsilon = y_d - y$. Zapisano to równaniami:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= y_d - y \\ \dot{x}_\varepsilon &= f_{h1}(x_\varepsilon, \varepsilon) \\ u &= g_{h1}(y_d) + g_{h2}(y) + g_{h3}(x_\varepsilon, \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

W równaniu (6.8) występują dodatkowe zmienne stanu regulatora – mogą to być np. całka z uchybu regulacji oraz, w zależności od postaci charakterystyki obiektu, dodatkowe zmienne związane z korygującymi elementami dynamicznymi. O stabilności układu sterowania decydują parametry regulatora, a zatem funkcja g_{h3} .

Charakterystyki sterownika, czyli funkcje g_{h1} , ..., g_{h3} , mogą się zmieniać w zależności od stanu systemu, wielkości zadanej oraz wewnętrznych zmiennych. Mogą zatem podlegać procesowi adaptacji. W analizowanym zagadnieniu istotna jest funkcja opisująca regulator. Dla regulatora zostanie zdefiniowane wzmocnienie:

$$k_r = \frac{\partial g_{h3}(x_\varepsilon, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} \quad (6.9)$$

Do dalszej analizy zostaną przyjęte trzy modele reakcji sterownicy:

- 1) model siły reakcji sterownicy klasycznej (wolant, drążek)

$$F = (k \cdot (u - u_0(x_a)) + c \cdot \dot{u}) \cdot f_a(x_q) \quad (6.10)$$

- 2) model siły reakcji sterownicy pasywnej

$$F = (k \cdot (u - u_0) + c \cdot \dot{u}) \cdot f_a \quad (6.11)$$

- 3) model siły reakcji sterownicy aktywnej

$$F = (k \cdot (u - u_0(x_{c1})) + c \cdot \dot{u}) \cdot f_a(x_{c2}) \quad (6.12)$$

W celu uproszczenia modele oparto na założeniu liniowej zależności siły reakcji od wychylenia, opisanej współczynnikiem proporcjonalności k . Dodatkowo wprowadzony został współczynnik określający amplitudę siły f_a , a współczynniki k i c są odpowiednio normalizowane.

Ad 1. Siła reakcji sterownicy zależy od wartości sygnału sterującego u , szybkości zmiany tego sygnału oraz zmiennych stanu samolotu (x_a – zmienne stanu samolotu wpływające na położenie neutralne sterownicy, np. kąt natarcia, x_q – zmienne stanu wpływające na wielkość sił reakcji, np. ciśnienie dynamiczne).

Ad 2. Siła reakcji sterownicy zależy od wartości sygnału sterującego u i szybkości zmiany tego sygnału. Położenie neutralne jest stałe.

Ad 3. Siła reakcji sterownicy jest określona podobnie jak dla sterownicy pasywnej, ale położenie neutralne oraz aktualna wartość zależą od zmiennych stanu sterownika sterownicy. Możliwość sterowania pozwala na uzyskanie za pomocą sterownicy aktywnej m.in. także dwóch pozostałych charakterystyk.

Wykorzystanie możliwości sterowania siłą reakcji sterownicy wymaga określenia efektów występujących przy różnych charakterystykach oraz wpływu zmiany charakterystyk na sposób działania człowieka. Wyniki analiz i badań eksperymentalnych wskazują, że istnieje pewien zakres sztywności (czyli wartości parametru k), dla którego najłatwiej jest realizować sterowanie. Wpływ tłumienia powinien zapewnić stabilność ($c > 0$), lecz nie powinien ograniczać nadmiernie szybkości ruchu ($c < 1$).

Przy zbyt dużej sile reakcji można się spodziewać, że wysiłek wymagany do realizacji sterowania (czyli uzyskania odpowiednich wartości sygnału u) będzie skutkował zmniejszeniem precyzji ustawiania. Może negatywnie wpłynąć na czas reakcji, a równocześnie działać zniechęcająco na aktywność pilota.

Poza aktualną siłą reakcji na działanie człowieka wpływa sztywność sterownicy, którą opisuje zmiana siły odczuwanej przez człowieka w zależności od przemieszczenia, czyli gradient:

$$S_F = \frac{\partial F}{\partial u} \quad (6.13)$$

Zbyt mała sztywność powoduje, że człowiek musi kontrolować położenie elementu sterowanego bezpośrednio. Dodatkowy wysiłek jest związany z koniecznością utrzymywania położenia neutralnego, a określenie położenia neutralnego jest możliwe jedynie na podstawie analizy stanu procesu sterowanego. Tymczasem przy znaczących siłach reakcji położenie neutralne powinno stanowić jakiś punkt odniesienia dla pilota.

Co do wpływu zmiany charakterystyki sterownicy przyjęto następującą hipotezę badawczą:

W przypadku sterownicy o sterowanej charakterystyce (f_a zmienne) zwiększenie sztywności działa hamująco na działania człowieka.

Wpływ charakterystyki sterownicy na działanie człowieka należy rozpatrywać w szerszym kontekście współpracy ze zautomatyzowanym samolotem. Wykazanie poprawności hipotezy stanowi podstawę wykorzystania sterowania siłą

reakcji w celu zapobieżenia zjawiskom niepoprawnych interakcji na poziomie umiejętności.

Możliwość wpływu na działania człowieka wynika ze sposobu odczuwania poziomu wysterowania, czyli subiektywnej oceny aktualnej wartości sygnału u . Poziom wychylenia jest rejestrowany bezpośrednio przez proprioreceptory umożliwiające określenie położenia ręki dźwigni sterującej (układ kinestazy). Wzrok jest drugim kanałem informacyjnym, dostarczającym informacji o położeniu na podstawie obrazu. Tak w zadaniu sterowania samolotem, jak i w wielu innych zadaniach jest obciążony odbieraniem innych informacji i nie uczestniczy w ustawianiu wartości sterującej.

Siła reakcji organu sterowego stanowi dodatkową (w sterownicach izometrycznych podstawową) informację o wychyleniu sterownicy, a zatem o poziomie sygnału sterującego. W wielu zastosowaniach elementów zadających i przełączających zmianę siły wykorzystuje się do sygnalizacji przejścia do nowego stanu tego elementu. W organach sterowych, zwłaszcza stosowanych na obiektach ruchomych, wartość minimalna siły oporu powinna uniemożliwiać niezamierzone zmiany sygnału sterującego.

Zwiększanie się siły oporu wraz ze wzrostem wartości sygnału zadawanego stanowi informację o poziomie wysterowania. Dla samolotów z mechanicznym połączeniem wolantu lub drążka z powierzchniami sterowymi (także ze wzmacniaczami, ale już nie w układach odległościowych) siła jest informacją o rzeczywistym efekcie sterowania, który jest zależny nie tylko od wartości wychylenia, ale również od innych czynników. W takim samolocie pilot wykorzystuje w czasie sterowania raczej sygnał siłowy niż wartość wychylenia steru, w związku z tym wymaga się, aby wartości gradientów siły od przeciążenia oraz od prędkości lotu były odpowiednie [324, 325]. Zastosowana procedura trzymowania skutkuje wyzerowaniem siły wymaganej do utrzymania organu sterowego.

Opisane dwa efekty sugerują zmianę modelu działania człowieka, w którym sygnałem wyjściowym jest siła:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_e &= f_{h1}(x_e, \varepsilon) \\ F &= g_{h1}(y_d) + g_{h2}(y) + g_{h3}(x_e, \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (6.14)$$

natomiast położenie dźwigni wynika z równania:

$$u - u_0 = \frac{1}{k} \left(\frac{F_z}{f_a} - c \cdot \dot{u} \right) \quad (6.15)$$

Należy jednak pamiętać, że parametry równania (6.15) obejmują także efekty działania układu mięśniowego i tłumienie c może być znacznie zwiększone.

Nowy model sugeruje bezpośredni wpływ charakterystyki sterownicy na współczynnik wzmocnienia układu otwartego, co w teorii sterowania oznacza wpływ na stabilność. Przy zwiększaniu sztywności następuje redukcja wzmocnienia. W efekcie, w przypadku obiektu stabilnego powinno to doprowadzić do ustabilizowania układu zamkniętego.

Przy sensownym założeniu, że proces adaptacji jest wolniejszy niż proces sterowania, odpowiednio szybka zmiana charakterystyki polegająca na zwiększeniu sztywności powinna zredukować niestabilność wywołaną niepoprawną interakcją przed zadziałaniem mechanizmu adaptacji. Jest to argument za poprawnością postawionej hipotezy.

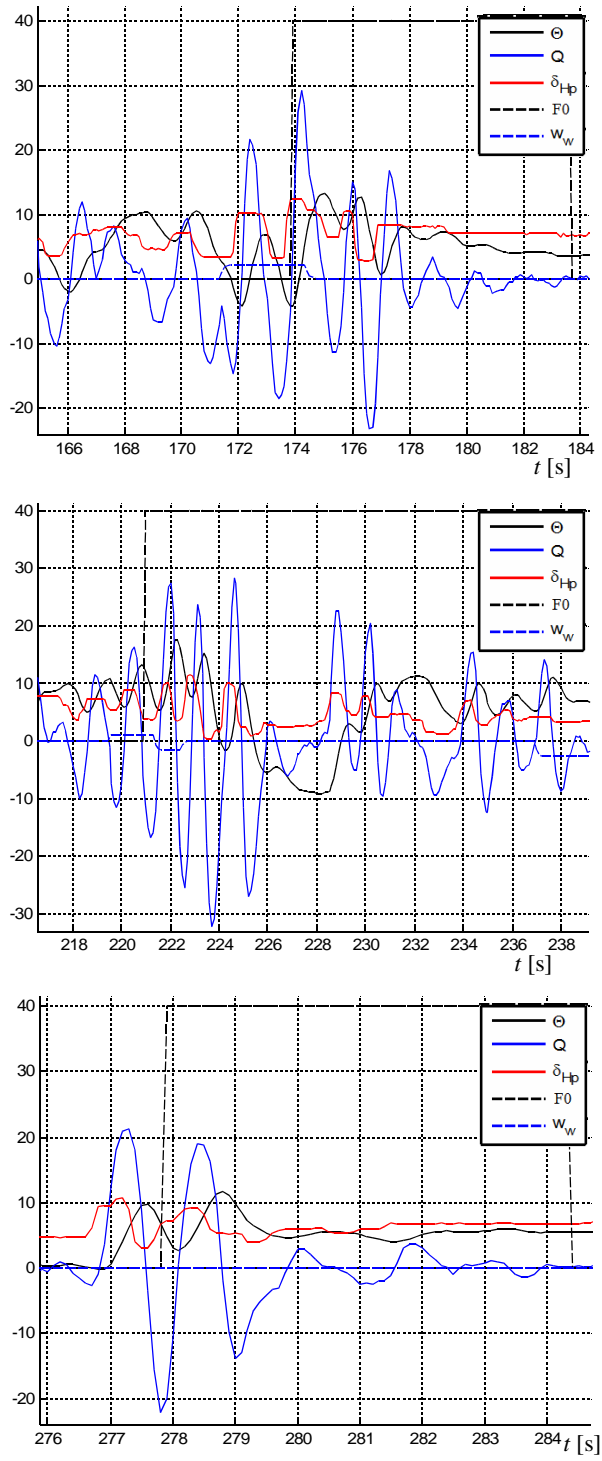
Zmiana sztywności, w odróżnieniu od przeciwdziałania, skutkuje odbiorem informacji podczas ruchu sterownicy. W ruchu należy się spodziewać zwiększenia współczynnika Webera dla percepcji sztywności [314]. Kolejną przesłanką dla sposobu formowania siły są wyniki badania liczby rozróżnianych poziomów sztywności i poziomu siły [38]. Stwierdzono, że powtarzalne jest rozróżnianie 2-3 poziomów. Jedynie osoby posiadające doświadczenie z zakresu współpracy z wieloma rozwiązaniami potrafiły rozróżnić 4 poziomy.

6.2.5. Badanie wpływu sztywności sterownicy na działania pilota

W eksperymencie zrealizowanym celem zbadania hipotezy dotyczącej wpływu zmiany sztywności sterownicy na działanie pilota jako niepoprawną interakcję wywoływano efekt nazywany oscylacjami indukowanymi przez pilota PIO [241]. Wykorzystując informacje o przyczynach wystąpienia zjawiska PIO w różnych sytuacjach [110, 136, 139, 179, 240, 260], określono, jakie parametry elementów pośredniego sterowania mogą zainicjować tę niepoprawną interakcję. Wartości parametrów zostały dobrane analitycznie na podstawie kryteriów podatności na PIO [241], a następnie zweryfikowane doświadczalnie. W czasie eksperymentu zastosowano model układu pośredniego sterowania z mechanizmem wykonawczym, z następującymi parametrami:

- częstotliwość własna 20 Hz,
- tłumienie 0,7,
- ograniczenie prędkości przemieszczania $30^{\circ}/s$,
- opóźnienie 0,05 s.

Z analiz informacji na temat efektu PIO wynika, że zdarzenia o takim charakterze są trudne do uzyskania w sposób przewidywalny, nawet biorąc pod uwagę fakt ich zaistnienia, i najczęściej pojawiają się w fazach lotu wymagających precyzyjnego sterowania. Należało także uwzględnić możliwość przerwania oscylacji przez zaprzestanie sterowania przez pilota. Ryzyko nauczenia się tego sposobu przeciwdziałania zminimalizowano przez ograniczenie okresów, kiedy konfiguracja sprzyjała wystąpieniu zjawiska. Do zainicjowania oscylacji wykorzystano podmuchy pionowe, natomiast zwiększenie podatności na PIO jest uzyskiwane przez zwiększenie opóźnienia.



Rys. 6.8. Zmienne w czasie sterowania z aktywnym asystentem

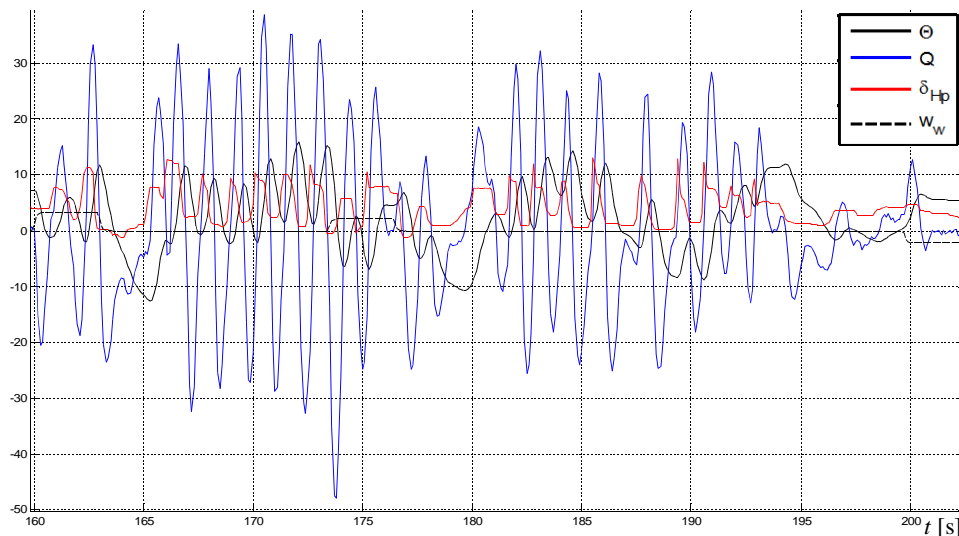
Podczas eksperymentu zarejestrowano następujące zmienne¹⁰:

- kąt pochylenia θ [°],
- prędkość kątową pochylenia Q [°/s],
- sygnał sterujący zadawany przez pilota δ_{Hp} [°],
- aktualne wychylenie steru wysokości δ_H [°],
- wartość prędkości podmuchu pionowego w_w [m/s], który jest najczęściej inicjatorem oscylacji,
- sygnał dF, którego zwiększenie oznacza moment zadziałania asystenta.

Wynikiem uzyskanym w efekcie realizacji eksperymentu jest ocena zachowania pilota na podstawie charakteru przebiegów sygnałów sterujących i zmienionych stanu. Przy sterowaniu z asystentem (oprogramowaniem oceniającym działanie pilota i sterującym aktywnymi organami sterowymi) zawsze po jego zadziałaniu następowało wytlumienie oscylacji, natomiast przy sterowaniu bez asystenta kilkakrotnie wystąpiły silne oscylacje.

Na rysunku 6.8 zaprezentowano trzy fragmenty, na których widoczna jest powtarzalna sekwencja zdarzeń: początek procesu wzbudzenia oscylacji, zadziałanie asystenta (widoczne jako zwiększenie wartości F0), powodujące w efekcie zmianę sposobu działania pilota i wytlumienie oscylacji. Jedynie w przedziale od 220 do 226 s niekorzystna konfiguracja dwóch podmuchów spowodowała, że oscylacje trwały dłużej niż w dwóch pozostałych przypadkach.

Wyniki próby, w której asystent nie był aktywny i pojawiły się silne oscylacje, są widoczne na rys. 6.9 (od 165 i 182 s).



Rys. 6.9. Zmienne w czasie sterowania bez asystenta (fragment z silnymi oscylacjami)

¹⁰Jednostki wielkości prezentowanych na wykresach zostały podane dla każdej zmiennej.

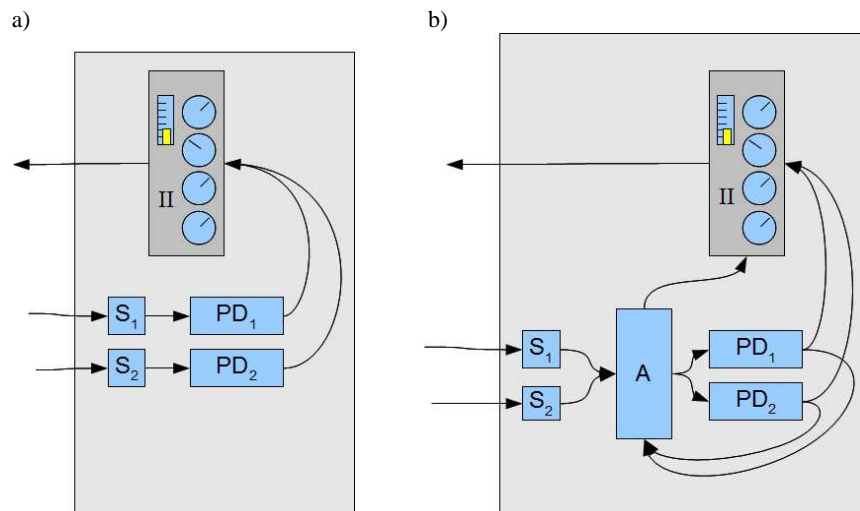
Wyniki eksperymentu potwierdzają możliwość wykorzystania zmiany sztywności jako sygnału ostrzegawczego oraz spowodowania zmiany sposobu działania skutkującej redukcją sygnału sterującego zadawanego przez pilota.

7. ASYSTENT PILOTA

7.1. Idea asystenta w procesie sterowania

Idea systemu wspomagającego jako asystenta pilota wynika z połączenia wielu funkcji wspomagających. W systemie sterowania bez wspomaganie, który symbolicznie zobrazowano na rys. 7.1a, sygnały sterujące procesami dynamicznymi PD są przekazywane przez interfejsy sterujące S, natomiast informacje o stanie są prezentowane na wskaźnikach interfejsu informacyjnego II.

Wspomaganie pilota przez układ techniczny tworzy nowy układ współpracy w porównaniu z typowym sterowaniem. Zmianę tę ilustruje rys. 7.1b, gdzie po wprowadzeniu asystenta A nastąpiła zmiana przepływu sygnałów sterujących procesami dynamicznymi PD. Sygnały te mogą być modyfikowane przez asystenta, który również wpływa na wskazania (przekazywane przez interfejsy informacyjne II) obrazujące stan procesów dynamicznych.



Rys. 7.1. Sterowanie obiektem: a) sytuacja typowego sterowania, b) po wprowadzeniu asystenta

Ponieważ asystent znalazł się na drodze sygnałów sterujących, to możliwa jest realizacja takiego sposobu działania asystenta, że w przypadku błędów pilo-

ta przejmując on sterowanie, wykonując je w sposób uznany za poprawny. Jest to sytuacja zastępowania pilota, w której istnieje niebezpieczeństwo nadmiernego zaufania działaniom asystenta i wyłączenia mentalnego pilota z czynności kontrolnych stanu samolotu. Jest to efekt uznania przez pilota automatycznych działań korekcyjnych systemu układów wspomagających za pewne w każdej sytuacji. Przyjęcie koncepcji wspomagania uwzględniającego konieczność zachowania odpowiedzialności pilota i utrzymania odpowiedniej świadomości sytuacyjnej prowadzi do metodyki realizacji zabezpieczającej przed wspomnianymi efektami.

Podstawowym zagadnieniem przy wprowadzaniu asystenta jest określenie jego roli oraz roli człowieka. Z przyjętych a priori założeń z zakresu pełnionych ról wynikają zarówno przydział zadań, jak i sposób ich realizacji. Podstawową cechą systemu sterowania z asystentem jest istnienie dwóch elementów sterujących – jednym jest człowiek, a drugim asystent. Ma to istotne znaczenie ze względu na konieczność współpracy pomiędzy nimi. Różne możliwości ukształtowania tej współpracy implikują przy projektowaniu asystenta konieczność uwzględnienia jego roli w zespole. Biorąc pod uwagę różne czynniki, można określić następujące role asystenta w zespole:

- 1) ze względu na poziom realizacji celu sterowania
 - a) podejmujący decyzje – dowódca,
 - b) realizator – podwładny,
- 2) ze względu na wagę podejmowanych decyzji
 - a) nadrzędna,
 - b) podrzędna,
 - c) równorzędna,
- 3) ze względu na rodzaj współpracy podczas realizacji zadania cząstkowego
 - a) realizator,
 - b) nadzorca/kontroler,
 - c) kooperant.

Ad 1. Role przyjęte podczas realizacji zadania, polegające na wprowadzeniu realizatora decyzji podejmowanych przez dowódcę tworzą najprostszą pod względem współpracy strukturę. Są bardzo często stosowane w układach wspomagających operatora, związanych z wykonaniem czynności niższego poziomu koniecznych do realizacji zadawanych przez człowieka celów wyższego poziomu (np. autopilot). Stosuje się je również do określania celów sterowania z wykorzystaniem systemu technicznego i realizacji sterowania przez człowieka (np. podejście ręczne do lądowania z wykorzystaniem systemu ILS). Jednoznaczne rozdzielenie zadania podejmowania decyzji od ich realizacji upraszcza analizę możliwych interakcji, upraszcza zatem strukturę systemu.

Ad 2. Określenie wagi podejmowanych decyzji jest związane z sytuacjami konfliktowymi. Jeśli zadania asystenta nie są ograniczone do wąskiego zakresu

realizacji czynności zadawanych przez dowódcę, ale obejmują także podejmowanie decyzji, to konieczne jest ustalenie hierarchii. Dobrym przykładem związanych z tym różnic jest porównanie podejścia największych producentów samolotów transportowych. Firma Boeing przyjęła założenie, że automatyka podlega pilotowi, który w sytuacjach konfliktowych zawsze może przeforsować swoją decyzję. Odmienne podejście reprezentuje firma Airbus, w której przyjęto, że automatyka nie tylko recenzuje decyzje pilota, ale także uniemożliwia mu działania, które uzna za niepoprawne.

Ustalenie równorzędnych wag jest w sytuacji konfliktowej problematyczne, gdyż oznacza, że sterowanie jest zawsze pewną średnią ważoną ze sterowań poszczególnych członków zespołu. W sytuacjach krytycznych, a właśnie wtedy istotne jest zapewnienie poprawnych decyzji, może to spowodować osłabienie działania w stosunku do wymaganego w danej sytuacji, a dodatkowo uśrednione działanie jest często całkowicie błędne, podczas gdy różne decyzje rozwiązują problem.

Różnice we właściwościach człowieka i układów technicznych stanowią potencjał dla efektywnego sterowania, obejmującego zarówno sytuacje typowe (kiedy lepiej radzą sobie układy techniczne), jak i niestandardowe (kiedy człowiek może znaleźć rozwiązania na podstawie zarówno wiedzy, jak i działając intuicyjnie), które powinny być uwzględniane przy podejmowaniu decyzji.

Ad 3. Konieczność określenia sposobu współpracy pojawia się podczas realizacji zadań skomplikowanych, umożliwiając pełniejsze wykorzystanie zasobów i właściwości członków zespołu. Wówczas zamiast równoległego podejmowania i forsowania swoich decyzji możliwe jest wyróżnienie zadań w ramach kooperacji. Generalnie przyjęcie dwóch ról: realizatora i nadzorca powoduje wykorzystanie zasobów obydwu członków zespołu. Czynniki pominięte przez realizatora mogą być uwzględnione przez kontrolera. Niestety, nadal pozostaje problem wagi decyzji, czyli w sytuacji wykrycia niepoprawnego działania realizatora określenia, czy kontroler ma uniemożliwić kontynuację (a więc zmienić swoją rolę), czy jedynie poinformować o niebezpieczeństwie.

Podczas realizacji zadań złożonych, w których wyróżnia się zadania składowe, istnieje dodatkowa możliwość kooperacji, wynikająca z rozdzielenia zadań na członków zespołu. Wtedy jeden z członków zespołu zajmuje się zadaniem na poziomie wyższym, a zleczone zadania składowe wykonuje kooperant (podział dla tego zadania odpowiada rolom z pkt 1.). Istotne jest jednak to, że kooperant jest nadzorowany przez realizatora głównego, aby sposób realizacji zadania cząstkowego wpisywał się w zadanie całościowe.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że asystent może mieć różne cechy, przez co w różny sposób kształtuje charakterystyki całego systemu. Z punktu widzenia człowieka asystent może być wyodrębniony z systemu bądź stanowi zintegrowany element tego systemu. Przez zintegrowanie należy tu rozumieć integralność na poziomie funkcjonowania, a nie realizacji. W zintegrowanej awionice aplikację asystenta można uruchomić na tym samym komputerze co

inne aplikacje sterujące, pomiarowe, a nawet aplikacje związane z funkcjami obsługi pasażerów. Może to być także specjalnie do tego przeznaczony komputer połączony magistralą danych z resztą systemu.

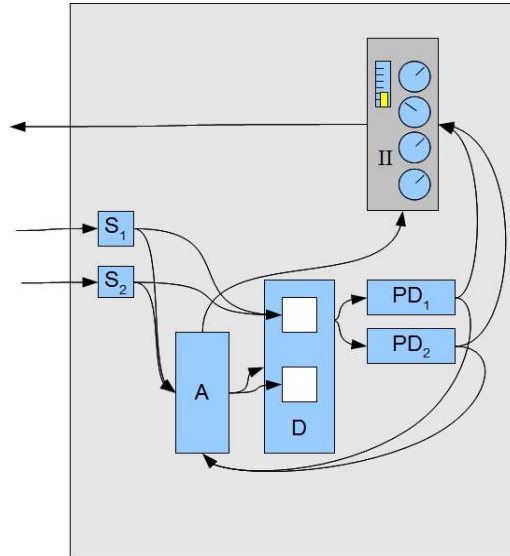
Ukształtowanie asystenta jako elementu systemu powoduje, że w efekcie następuje zmiana charakterystyk całego systemu, co odzwierciedla schemat na rys. 7.1b. Ponieważ sygnały sterujące nie oddziałują bezpośrednio na procesy dynamiczne, to w efekcie człowiek nie steruje tymi procesami, lecz procesami o efektywnej dynamice wynikającej z działania asystenta. Taka struktura oznacza, że nadrzędną rolę w systemie pełni asystent. Aby zmienić tę rolę, konieczne jest odłączenie asystenta lub wyłączenie jego określonych funkcji.

Asystent wyodrębniony z systemu staje się partnerem człowieka, a wykorzystanie go przybiera postać dialogu, w którym asystent przedstawia swoje propozycje, a równocześnie reaguje na działania człowieka. Przykładowo, jeżeli przyjęto nadrzędną rolę pilota, a decyzja asystenta nie została zaakceptowana, to asystent powinien zaakceptować decyzję pilota.

Wprowadzenie sterowanej siły reakcji sterownicy (rozdz. 6.) jest metodą zmiany struktury komunikacji pomiędzy urządzeniem a człowiekiem. Modyfikacja siły reakcji jest komunikatem, na który człowiek w jakiś sposób reaguje. W procesie sterowania pojawia się zatem dialog – obustronna wymiana informacji. W zależności od pozycji lub przyjętych ról uczestników przebieg dialogu może być różnorodny. Podstawowym czynnikiem określającym rolę w dialogu jest przyjęcie hierarchii. Należy zauważyć, że przy rozwiązaniach bez dialogu hierarchia jest ściśle ustalona, czyli tego co jest dozwolone podczas realizacji przez człowieka, układ nie zabrania, a to co nie jest dozwolone, staje się niemożliwe do realizacji. W przypadku dialogu pojawia się możliwość, ale także konieczność uzgadniania bądź akceptacji decyzji przez uczestników dialogu.

Struktura z wyodrębnionym asystentem przedstawiona na rys. 7.2 ukazuje podstawowy problem równoczesnego sterowania przez dwa elementy. Pojawił się dodatkowy element D, związany z decyzją wyboru sterowania. Element decyzyjny komplikuje strukturę całego systemu, co jednak nie oznacza, że model efektywny systemu jest bardziej złożony. Rolą projektanta, świadomego czynników związanych z interakcjami występującymi przy współpracy człowieka ze zautomatyzowanymi urządzeniami technicznymi, jest właśnie ukształtowanie sposobu działania systemu upraszczającego model efektywny, z zachowaniem odpowiedniego poziomu świadomości sytuacyjnej. Zastosowanie adaptacyjnej automatyzacji dostosowującej charakterystyki obiektu do potrzeb człowieka realizującego sterowanie jest ogólnym zaleceniem.

Wprowadzenie formy dialogu rozbudowuje funkcje interfejsów. Aby nie powodować przeciążenia informacyjnego, korzystne są modyfikacje elementów odbierających sygnały sterujące człowieka w taki sposób, aby także przez te elementy możliwy był dwukierunkowy przepływ informacji. Przekazanie informacji bezpośrednio przez organa sterowe jest metodą zwiększenia strumienia informacji bez konieczności zwiększenia obciążenia kanału wzrokowego. Jest to



Rys. 7.2. Schemat systemu z wyodrębnionym asystentem

szczególnie istotne w sytuacji, gdy sterowanie zadawane przez pilota nie jest realizowane ze względu na decyzję asystenta (nadrzędna rola asystenta).

Inną możliwością jest takie wykorzystanie charakterystyki organów sterowych, aby przy braku akceptacji decyzji podejmowanej przez człowieka siła reakcji przeciwdziałała tej decyzji, a w przypadku rezygnacji i puszczenia organu sterowego następowało sprowadzenie w położenie uznane przez asystenta jako odpowiadające prawidłowemu sterowaniu. Taki sposób działania asystenta oznacza, że pełni on funkcję kontrolną, nie uniemożliwiając sterowania.

7.2. Funkcje asystenta

7.2.1. Zadania asystenta

Na podstawie przeprowadzonej analizy i badań cząstkowych dotyczących kształtowania współpracy człowieka z systemem automatycznego sterowania postuluje się następujące funkcje asystenta:

- kształtowanie charakterystyki sterownicy, obejmujące
 - charakterystykę siły reakcji,
 - automatyczne trymowanie,
 - formowanie sygnału sterującego,
- kształtowanie właściwości pilotażowych samolotu lub adaptacja charakterystyk z uwzględnieniem warstwy znaczeniowej sygnału zadawanego,
- ostrzeganie przez interfejs informacyjny oraz aktywne organa sterowe poprzedzone
 - oceną zmiennych stanu samolotu,

- oceną stanu otoczenia,
- oceną działań pilota,
- kształtowanie charakterystyk interfejsów informacyjnych obejmujące
 - dopasowanie charakterystyki przekazywanego sygnału do realizowanego zadania,
 - konfigurowanie zakresu przekazywanych zmiennych dostosowanych do zadania sterowania.

7.2.2. Trymowanie

Trymowanie samolotu polega na skompensowaniu sił na organach sterowych znajdujących się w stanie zapewniającym uzyskanie ustalonego stanu lotu. Ogólnie stanem ustalonym lotu samolotu jest taki lot, którego trajektoria przy braku zakłóceń jest linią śrubową [135]. Najczęściej samoloty są wyposażane tylko w trymer służący do ustalania lotu prostoliniowego. Przy mechanicznym przeniesieniu wychyleń drążka czy wolantu na powierzchnie sterowe zastosowanie trymera redukuje wysiłek fizyczny pilota w stanach ustalonych.

Pojęcie trymowania jest także stosowane w zagadnieniach dotyczących poszukiwania takiego sterowania, aby uzyskany został założony stan lotu ustalonego lub stan quasi-ustalony [114]. Przy zastosowaniu układu pośredniego sterowania położenie neutralne sterownicy jest stałe (pasywna sterownica) lub zależy od sterowania (aktywna sterownica). W drugim przypadku zagadnienie trymowania obejmuje równoczesne sterowanie elementem odciążającym mechanizm wykonawczy (lub mechanizm wykonawczy utrzymuje stałe położenie steru bez dodatkowego układu odciążającego) i sterowanie charakterystyką siły sterownicy.

W celu realizacji automatycznego trymowania konieczne jest określenie stanu ustalonego. Rozwiązanie analityczne wynikające z równania (3.2) ma następującą postać:

$$-f\left(\begin{bmatrix} x_d \\ x_v \end{bmatrix}\right) = g\left(\begin{bmatrix} x_d \\ x_v \end{bmatrix}\right) \cdot u_0 \quad (7.1)$$

gdzie $x_d = y_d$ są tymi zmiennymi stanu, których wartości zostały zadane i są dostępne w wektorze wyjściowym, natomiast x_v są to pozostałe zmienne stanu.

Niech $u_0 \in A \subset \mathbb{R}^m$ i A jest zbiorem możliwych wartości sterowania. Typowo zbiór ten będzie określony przez przedziały osiągalnych wartości poszczególnych sygnałów sterujących. Rozwiązania równania (7.1) tworzą zbiór opisany przez funkcję:

$$u_0 = \Xi(x_d) \quad (7.2)$$

Mimo że analityczne rozwiązanie zagadnienia trymowania jest zadaniem złożonym, to pilot potrafi uzyskać ustalony stan lotu z założonymi parametrami (y_d) przez kolejne modyfikacje, czyli metodę iteracyjną. Nabywając doświadczenia, pilot tworzy swój model wewnętrzny, pozwalający na uzyskanie już w pierwszej iteracji stanu zbliżonego do pożądanego (działanie typu R_i). Odtworzenie tego procesu w układzie technicznym jest możliwe przez odtworzenie zależności (7.2). W procesie estymacji zależności (7.2) przyjęto wykorzystanie informacji zebranych podczas realizacji lotów.

Niech zarejestrowane informacje obejmują zbiór zmiennych stanu oraz sygnały sterujące:

$$\chi(t) = [X(t), U(t)] \quad (7.3)$$

W zbiorze $X(t)$ należy rozróżnić stany ustalone, w których przy stałych wartościach sygnałów sterujących ruch samolotu odbywa się po trajektorii stacjonarnej (ogólną postacią takiej trajektorii jest linia śrubowa, a w szczególności są to linia prosta i zakręt bez zmiany wysokości).

Niech $\zeta(\chi(t))$ będzie detektorem stanów ustalonych zrealizowanym jako pewien operator. Wynikiem działania detektora jest zbiór τ_u obejmujący te chwile czasowe, dla których stwierdza się, że samolot znajdował się w stanie ustalonym:

$$\tau_u = \zeta(\chi(t), \Delta\chi) \quad (7.4)$$

W warunkach rzeczywistych (zarówno lotów, jak i testów symulacyjnych) detekcja stanu ustalonego musi uwzględniać zarówno występowanie niewielkich zmian wartości sygnałów sterujących, jak i zmian stanu będących efektem zakłóceń zewnętrznych (np. turbulencja) i zakłóceń wewnętrznych (np. mimowolne ruchy sterownicą i nieświadome ruchy przeciwdziałające zakłóceniom). W zastosowanym detektorze (7.4) zostało to zapisane jako dopuszczalna tolerancja zmian wielkości $\Delta\chi$ w stanie traktowanym jako ustalony.

Zbiór $\chi_u = \{\chi(t) : t \in \tau_u\}$ będzie zbiorem uczącym dla odtworzenia zależności (7.2). Przy odtwarzaniu zależności (7.2) wynikiem uczenia zrealizowanego z wykorzystaniem algorytmu wstecznej propagacji błędu [168, 206, 326], połączonego z metodą najmniejszych kwadratów [261, 317], są parametry dla algorytmu pracującego jako system rozmyty typu Takagi-Sugeno [108]. Wykorzystano tutaj zdolność układów rozmytych do aproksymacji funkcji [145, 278, 309].

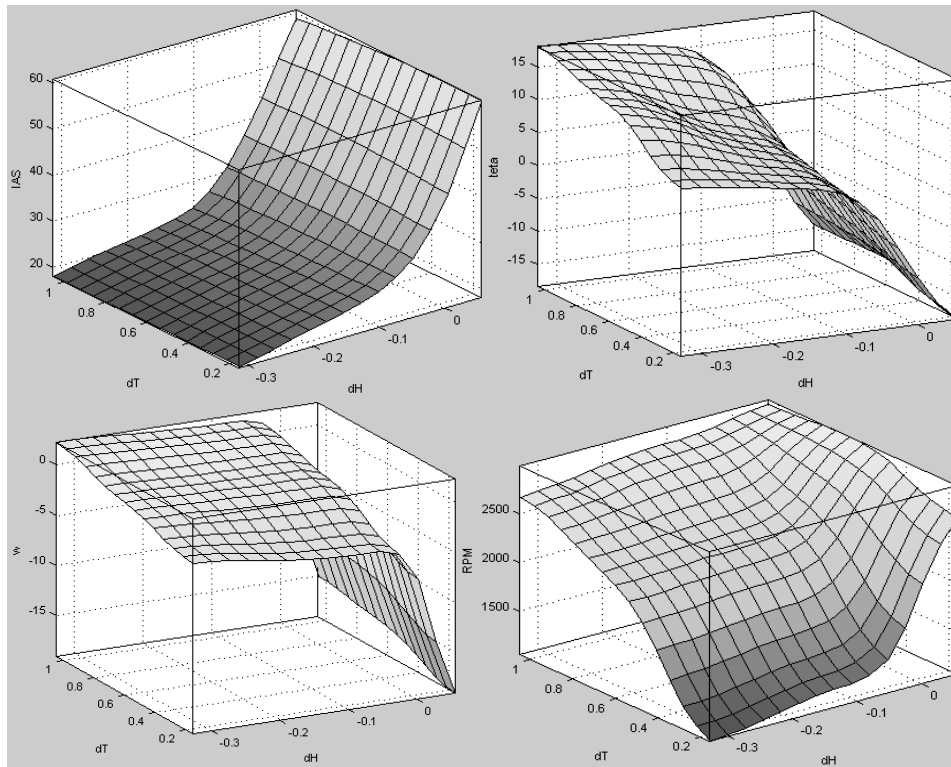
Pewną trudnością w praktycznej realizacji tego algorytmu jest możliwość zmian masy i rozkładu masy samolotu, co powoduje zmiany funkcji. Te zmiany przekładają się bezpośrednio na wymagane wartości sygnałów sterujących

w stanie ustalonym. Rozwiązaniem jest wykorzystanie faktu, że zmiany masy i przemieszczenie środka masy w normalnych lotach są procesami wolnozmiennymi, stąd wartości wykorzystywane podczas uczenia są wartościami średnimi. Niech równanie

$$\chi_{av}(t) = [X_{av}, U_{av}] = \left[\frac{1}{|\tau_s|} \int_{t \in \tau_s} X(t) dt, \frac{1}{|\tau_s|} \int_{t \in \tau_s} U(t) dt \right] \quad (7.5)$$

definiuje operatory działające na pewnym odcinku czasu τ_s , takim że $\tau_s \subset \tau_u = \zeta(\chi(t), \Delta\chi)$, natomiast $|\tau_s|$ jest długością odcinka.

Wartości $\chi_{av}(t)$ służą do wyznaczenia aktualnego rozkładu masy i tym samym określenia, która z charakterystyk trymowania jest prawidłowa. Na rysunku 7.3 przedstawiono charakterystyki zależności wybranych zmiennych stanu samolotu w stanie ustalonym, określonych przez wartości sygnałów sterujących. Dane uczące uzyskano, wykonując loty testowe.



Rys. 7.3. Zależności zmiennych stanu samolotu w zależności od sygnałów sterujących w stanie ustalonym

Wynikowe charakterystyki służą do detekcji stanu ustalonego. Po stwierdzeniu zgodności wartości sygnałów sterujących wynikających ze stanu aktualnego z aktualnymi wartościami sygnałów sterujących układ automatycznego trymowania ustala położenie neutralne dla aktualnego wychylenia steru. Oceniana jest także poprawność stanu ustalonego. Jeśli przy aktualnej konfiguracji samolotu dla aktualnych wartości sygnałów sterujących stan ustalony nie może być osiągnięty lub nie jest to stan poprawny (np. zbyt duża lub zbyt mała prędkość), to nie jest realizowana procedura trymowania.

7.2.3. Ostrzeżenie i przeciwdziałanie

Dla człowieka odbierającego informacje o działaniu układu asystenta i o procesie sterowania interpretacja zamiarów oraz przyczyn obserwowanego sposobu działania powinna być czytelna. Informacja podawana jedynie jako bodziec w postaci siły reakcji organu sterowego nie może w pełni odzwierciedlać przyczyny zadziałania (np. stany wymagające zwiększenia mocy to: zbyt mała prędkość, nadmierne opadanie, konieczność utrzymania prędkości po rozpoczęciu manewru, konieczność przejścia do wznoszenia na małej wysokości). Informacja mająca jedynie formę przekazu wizualnego może zostać przeoczona. Połączenie obydwu form przekazu zapewnia poznanie przyczyny zadziałania oraz sugeruje sposób przeciwdziałania.

Prostym rozwiązaniem interfejsu informacyjnego asystenta jest zastosowany panel ostrzeżeń (przykładowe rozwiązanie przedstawiono na rys. 7.4), na którym każdej sytuacji odpowiada kontrolka z graficzną prezentacją sytuacji. W panelu ostrzeżeń zastosowano konwencję prezentacji stanu z wykorzystaniem kolorów:

- czerwonego – alarm wymagający natychmiastowej reakcji (*warning*),
- żółtego – ostrzeżenie wymagające zwrócenia uwagi (*caution*),
- zielonego – informacja o działającym asystencie.

Znaki graficzne zostały tak dobrane, aby interpretacja przyczyny ostrzeżenia była intuicyjna i informowała zarówno o zaistniałej sytuacji (tryb pasywny), jak i sposobie działania asystenta (tryb aktywny).



Rys. 7.4. Widok pulpitu ostrzeżeń – wszystkie kontrolki ostrzegawcze zaświecone

Na rysunku C10 (dodatek C) pulpit został zintegrowany z kokpitem na eksperymentalnym stanowisku. Sytuacja sygnalizowana w tym konkretnym przypadku to zbyt strome niżenie i nadmierna prędkość lotu, z równoczesnym przekroczeniem kąta przechylenia (wartości granic zostały dobrane arbitralnie). Należy jednak zwrócić uwagę na ograniczenia użyteczności takiego rozwiązania interfejsu informacyjnego asystenta. Przy dużej liczbie ocenianych sytuacji powierzchnia pulpitu musiałaby być znaczna. Dodatkowo, zwiększenie liczby symboli graficznych może stwarzać problemy z poprawną interpretacją stanu. Rozwiązaniem zaistniałej komplikacji jest zastosowanie koncepcji EID opisanej w pkt 7.5.

Realizacja dialogu pomiędzy pilotem a asystentem stawia wymaganie, aby asystent posiadał cechy, które nie są typowe w układach technicznych, a zwłaszcza układach sterujących, czyli posiadał zdolność akceptacji decyzji pilota i zmiany sposobu działania w efekcie tych decyzji. Należy pamiętać, że akceptacja decyzji nie oznacza prostej realizacji rozkazu, jak się to odbywa w systemach sterowania.

W zależności od reakcji pilota na ostrzeżenia asystent może:

- przy rozbieżnych intencjach
 - zaakceptować nowe zamiary pilota, zaprzestając reakcji przeciwdziałającej,
 - przejść do trybu oczekiwania na chwilę, kiedy pilot przestanie sterować, aby ponowić swoje działanie,
 - pozostać w trybie informującym o zagrożeniu i równocześnie podejmować działania, które wymuszają na pilocie ciągłe przewyciężanie, gdy chce pozostać przy swoich zamiarach,
 - przejść do trybu ostrzeżeń,
 - uniemożliwić pilotowi realizację działania uznanego za błędne (przy koncepcji nadrzędnej roli, obejmującej co najmniej część czynności sterujących),
- przy zbieżnych intencjach, czyli po zaakceptowaniu przez pilota sugestii asystenta
 - pozwolić na kontynuowanie sterowania przez pilota,
 - wyprowadzić automatycznie samolot z sytuacji zagrożenia,
- przeprowadzić weryfikację poprawności oceny stanu.

Opisane działania należy rozumieć w perspektywie pewnego przedziału czasu. Oznacza to, że konsekwencje podjętej decyzji określają sposób realizacji działania asystenta w przedziale czasu (t, t_k) . To, jak ma zostać określona chwila t_k , jest kolejnym zagadnieniem istotnym dla poprawności współdziałania.

Problem nie jest banalny, gdyż o ile akceptacja działania asystenta powinna doprowadzić do ustania przyczyny jego reakcji, to brak akceptacji może skutkować zmianami stanu pogłębiającymi sytuację krytyczną (np. nadmierna prędkość lotu może dodatkowo doprowadzić do przekroczenia dopuszczalnych obro-

tów śmigła czy silnika) lub zmienić tę sytuację (np. przejście do wznoszenia na małej wysokości przy zredukowanej mocy zespołu napędowego lub zbyt duża wartość kąta pochYLENIA doprowadzają do niebezpiecznej utraty prędkości).

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest określenie aktualnej sytuacji nie tylko na podstawie analizy stanu, ale także z uwzględnieniem warunków, w jakich się lot odbywa i uwarunkowań wynikających z realizowanej fazy lotu [42, 221]. Dlatego jedną z funkcji asystenta powinien być algorytm identyfikacji stanu lotu z wyróżnieniem obecnie realizowanej fazy.

Przedstawiona analiza pokazuje, że koncepcja asystenta pilota wymaga nowego podejścia do sposobu działania układu technicznego, opartego na analizie procesu dialogu pomiędzy pilotem a układem technicznym. W kontekście dialogu, czyli z uwzględnieniem, jak określona reakcja będzie interpretowana przez człowieka, należy analizować i projektować układy, których działanie ma charakter asystenta.

7.3. System agentowy i realizacja asystenta

7.3.1. Pojęcie agenta

Rozwiązywanie coraz bardziej złożonych zadań przez coraz bardziej złożone systemy techniczne spowodowało konieczność podziału zadań na mniejsze zadania cząstkowe i realizację w strukturze rozproszonej. Dekompozycja całościowego zadania na zadania składowe pozwala na rozdział zadań cząstkowych pomiędzy wiele jednostek realizujących. W zależności od sposobu realizacji jednostki te mogą być urządzeniami (*hardware agents*, np. rozważa się współpracę robotów, działania zespołów samolotów bezzałogowych [7, 15-17, 66, 207, 233, 249], a także przedsiębiorstw [167, 169]) lub współpracującymi albo konkurującymi ze sobą aplikacjami – *software agents* (np. przy wyszukiwaniu informacji [3]) bądź elementami aplikacji (np. wynikających z wydzielenia zadań w sterowaniu [37, 170]). Agent programowy współdziałający z człowiekiem jest obserwowany przez elementy, jakie wykorzystuje do komunikacji. Możliwe jest ukształtowanie form: wizualnej (obrazu generowanego komputerowo) lub behawioralnej (sposobu wymiany informacji), naśladujących człowieka. Forma komunikacji zbliżona do komunikacji międzyludzkiej zwiększa aktywność człowieka przy odbiorze przekazywanej informacji i wykorzystaniu agenta w procesie nauczania [291].

Koncepcja systemów wieloagentowych [79, 307] jest kolejnym etapem rozwoju oprogramowania, które powinno zwiększać elastyczność rozwiązań, umożliwiać wielokrotne wykorzystanie komponentów oraz wymienność komponentów w czasie pracy. Cecha wymienności komponentów umożliwia z kolei tworzenie systemów rekonfigurowalnych oraz wprowadzenie mechanizmów tolerancji uszkodzeń. Wymienione cechy uważa się za perspektywiczne w sys-

temach sterowania samolotami i w koncepcji rozproszonej modularnej awioniki (IMA – *integrated distributed modular avionics* oraz IMA-2G) [46, 230, 338]. Koncepcja ta jest stosowana w eksploatowanych samolotach najnowszej generacji i rozwijana przez koncerny lotnicze BOEING i AIRBUS. Podejście do obsługi funkcji kokpitu, w którym do obsługi elementów sprzętowych tworzone są klasy reprezentujące agentów związanych z właściwościami, stanem i zachowaniem (*system agents*) oraz kolejne klasy agentów zajmujące się zadaniami (*task agents*), zostało wykorzystane do nadzoru nad poprawnością działań i wspomaganie pilota w ramach projektu badawczego NASA [85].

7.3.2. System agentowy

Działanie systemu wieloagentowego wynika zarówno z zachowania się każdego z agentów z osobna, jak i z interakcji występujących pomiędzy agentami. Ze względu na bogactwo różnych rozwiązań i koncepcji systemów agentowych istnieją różne kryteria klasyfikacji. W opracowaniu [14] zostały wyróżnione następujące kryteria:

- architektura wewnętrzna (homogeniczna, heterogeniczna),
- organizacja (hierarchiczna, holoniczna, zespołowa, koalicyjna, jednorodna pod względem współpracy),
- komunikacja (lokalne połączenia między agentami, ogólne komunikaty).

Różne możliwości z zakresu samej budowy agenta spowodowały wyróżnienie następujących podstawowych rodzajów agentów (a w zasadzie cech, które można łączyć w jednym agencie) [192, 291]:

- reagującego na bodźce (*reactive*) – czyli sposób działania agenta jest reakcją na stan odbierany,
- proaktywnego (*proactive*) – dotyczy to ogólnego podejścia do realizacji zadań; w odróżnieniu od agenta reagującego na bodźce agent proaktywny sam poszukuje i inicjuje działania zgodnie z założonym celem (*goal directed*),
- podejmującego decyzje (*deliberative*) – oznacza to, że działania agenta wynikają z celów, jakie realizuje, modelu środowiska, w jakim działa, a odbierane informacje są wstępnie analizowane przed wykorzystaniem w działaniu,
- współpracującego (*interacting*) – jego współpraca z innymi agentami wymaga mechanizmów komunikacji.

W nowszych pracach dotyczących systemów wieloagentowych [14] przyjmuje się, że agent powinien się cechować wszystkimi zdolnościami podstawowymi, natomiast istotnym zagadnieniem jest określenie mechanizmów, które organizują strukturę systemu.

Interakcja obejmuje wiele zagadnień, takich jak:

- współpraca przy równocześnie realizowanym zadaniu, czyli podział zadań cząstkowych, synchronizacja czasowa,

- przekazywanie informacji pomiędzy agentami, w tym sposób uzgadniania informacji o stanie systemu i stanie otoczenia, w jakim się znajduje system,
- adaptacja systemu do zmieniających się warunków, obejmująca alokację zadań cząstkowych, detekcję i izolację agentów niesprawnych, rekonfigurację zadań z uwzględnieniem celu strategicznego i aktualnego stanu systemu.

W szczególności zdolność adaptacji jest istotną zaletą systemów agentowych. Wynika ona z możliwości tworzenia różnych struktur systemu wieloagentowego, zależnych od realizowanych zadań.

Wprowadzenie agenta nadzorującego (*supervisor*) jest jednym ze sposobów rozstrzygania konfliktów oraz przydziału zadań. Takie podejście zastosowano dla wieloagentowego systemu z opisem koordynacji [67]. W pracy [167] wprowadzono pojęcie metaagenta, którego działania dotyczą analizy stanu systemu agentowego (agent pasywny) oraz ingerencji w strukturę przez wpływ na wiedzę, intencje i połączenia (agent aktywny). W koncepcji systemów współpracujących z człowiekiem zastosowano strukturę hierarchiczną, w której występują agenci koordynujący zespoły samolotów realizujących zadania cząstkowe [15, 16]. System nadzoru wspomaga pracę osób sterujących zespołami aparatów.

Ogólna struktura agenta w systemie sterowania będzie się opierać na opisie wykorzystywanym w systemach robotowych [290]. Taki agent składa się z następujących elementów:

- części przetwarzającej,
- efektorów z prioprioreceptorami (czyli układami informującymi o stanie efektorów),
- czujników z czujnikami i eksteroreceptorami (czyli układami dostarczającymi informacji o stanie otoczenia),
- układów transmisji danych pomiędzy agentami.

Sposób działania agenta można sprowadzić do przetwarzania danych, dlatego podstawowymi elementami części przetwarzającej są zbiory danych związane z poszczególnymi elementami:

- zmienne stanu obrazu x_a
 - x_{ae} – obraz stanu efektorów, który odzwierciedla stan efektorów x_e ,
 - x_{ac} – obraz stanu czujników, który odzwierciedla stan czujników x_c ,
 - x_{aT} – obraz stanu odbieranego przez układy transmisji, który odzwierciedla stan innych agentów,
- zmienne wyjściowe y
 - y_e – rozkazy wysyłane do efektorów,
 - y_c – rozkazy sterujące czujnikami,
 - y_T – sygnały wysyłane do innych agentów,
- zmienne stanu wewnętrznego x_i .

Zmienne wewnętrzne zmieniają się zgodnie z zależnością:

$$x_i(k+1) = f_x(x_a(k), x_i(k)) \quad (7.6)$$

natomiast działanie agenta jest realizowane przez sygnały wyjściowe. Sygnały są odświeżane w dyskretnych chwilach czasowych k przez funkcję przejścia:

$$y(k) = f_y(x_a(k), x_i(k)) \quad (7.7)$$

Dodatkowym elementem opisu działania jest warunek zakończenia sekwencji sterującej w postaci funkcji boolowskiej:

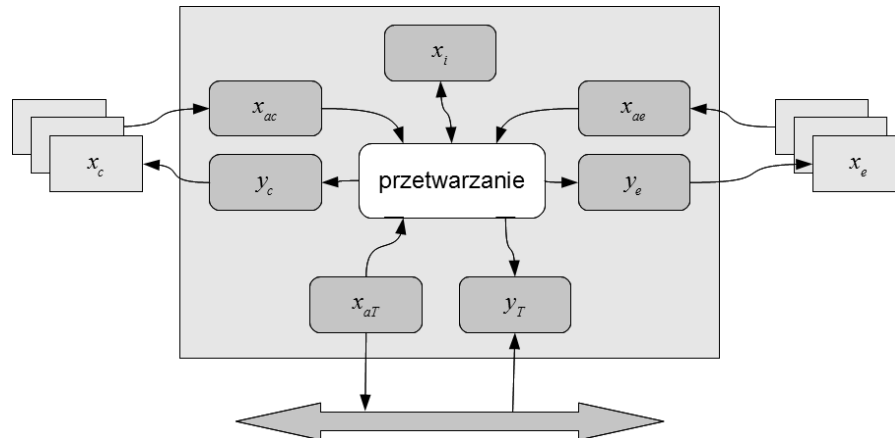
$$f_f(x_a(k), x_i(k)) \in \{\mathbf{true}, \mathbf{false}\} \quad (7.8)$$

W systemach wieloagentowych pojawia się zagadnienie określenia sposobu działania zespołu. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie centralnego elementu sterującego. Dla takiej struktury opracowano języki opisujące zachowanie agentów w kontekście realizacji celu [44]. Rozszerzenie funkcji agenta jest możliwe dzięki wyposażeniu go w umiejętność oceny sytuacji i formułowania własnych celów. Wprowadzenie tych funkcji może powodować konflikty i wtedy pojawia się konieczność uzgodnienia działań. Jedną z propozycji jest język ADL (*action description language*) [137]. W opisie systemu agentowego pozostał element nadzoru, może on jednak pełnić rolę pasywną, tj. informować o zaistniałym konflikcie, pozostawiając rozwiązanie agentom, których działania wywołały konflikt. Rozstrzygnięcie konfliktów na poziomie agentów wprowadza element dialogu pomiędzy agentami.

Pełne wykorzystanie możliwości systemu agentowego to zdolność realizacji zadań w różnych konfiguracjach (w tym po utracie części agentów), przy zmieniających się celach i warunkach otoczenia. Realizacja takiego systemu stawia szczególne wymagania rozwiązaniom komunikacji, przy której konieczne jest uwzględnienie niepewności przekazu i niekompletności obrazu stanu. W proponowanym sposobie opisu dialogu w pracy dotyczącej wieloagentowego systemu diagnostycznego [189] wprowadzona została niestandardowa logika, obejmująca opis niepewności co do aktualnego stanu. W samym procesie dialogu wyróżniono kilka typów dialogu (perswazja, zapytanie, poszukiwanie informacji, negocjacje), które są składnikami procesu komunikacji.

Dla systemów wieloagentowych, w oprogramowaniu opartym na zadaniowo zorientowanych agentach programowych [79], w opisie agenta wymieniono kolejne elementy wynikające z opisu zachowań. W tym kontekście elementy zaprezentowane na rys. 7.5 są składnikami strukturalnej części modelu (*structural model*), natomiast druga część modelu dotyczy zachowań (*behavioral model*) i obejmuje takie elementy, jak:

- baza wiedzy (*knowledge base*),
 - odwzorowanie stanu otoczenia (*belief*),
 - generator działań (*action*),
 - cele do zrealizowania (*goals*) i plany realizacji (*plans*),
- oraz dodatkowe czynniki wpływające na decyzje:
- zdarzenia (*events*),
 - zbiór sposobów reakcji na zdarzenia (*capability*),
 - oddziaływanie innych agentów (*services*).



Rys. 7.5. Schemat struktury agenta

Porównując wymienione elementy z opisem działania w postaci zależności (7.6) i (7.7), zauważa się, że opisy te prezentują model na różnym poziomie hierarchii celu. Wyróżnienie zdarzeń jest istotne dla działania agenta. Każde zdarzenie obsługiwane przez agenta uaktywnia określony plan działań, a równocześnie działanie może aktywować inne zdarzenia. Zdarzenia wpływają z kolei na cele do realizacji (np. zakończenie sekwencji działań i osiągnięcie aktualnego celu).

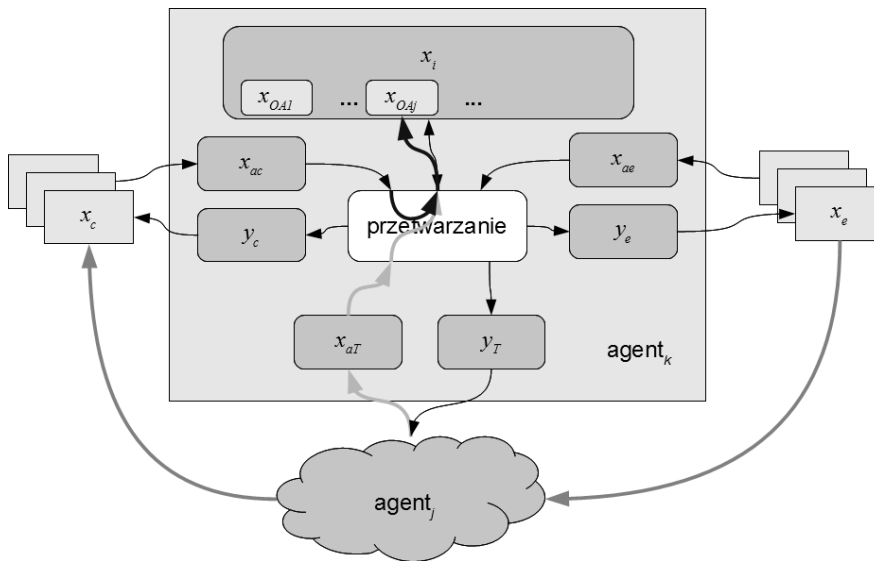
Podczas współpracy agentów w systemach wieloagentowych (MAS – *multiagent system*) istnieje zagadnienie informacji, jakie każdy z agentów posiada o innych agentach ($x_{AO1}, x_{AO2}, x_{AO3}, \dots$), będącej częścią zmiennych stanu wewnętrznego agenta (x_i). Dobrym pojęciem określającym informacje o innych agentach będzie obraz stanu agentów. Jest to ważny element systemu wieloagentowego, gdyż działania w ramach współpracy agentów opierają się na obrazach stanu. Ponieważ nie ma sensu, aby każdy agent wiernie odwzorowywał stan innych agentów, modele wykorzystywane do opisu agentów znajdujących się w otoczeniu muszą być uproszczone.

Obrazy stanu agentów są tworzone na podstawie dostępnych informacji, z wykorzystaniem przyjętych modeli, a zatem:

- bezpośrednio na podstawie przekazu x_{aT} ,
- pośrednio na podstawie analizy stanu x .

Informacje dostępne na podstawie przekazu mogą tworzyć bezpośrednio, lub po przetworzeniu do postaci odpowiedniej dla modelu odwzorowania, obraz stanu agenta (na rys. 7.6 agenta j). W pozycji [17] przy tworzeniu obrazu agenta wykorzystano pojęcie przekonania (*belief*) co do aktualnej wiedzy i zamiarów innego agenta. To pojęcie uświadamia, że podczas współpracy agentów pojawia się zagadnienie konieczności oceny wiarygodności modelu innego agenta. Jest to efekt odrzucenia typowego w technice założenia, że agenci uczestniczący w realizacji zadania mają zawsze zamiary zgodne i realizują je, współpracując. Uzasadnieniem tego są następujące przesłanki:

- podczas współpracy autonomicznych agentów uzgodnienie sposobu współdziałania może być zaburzone przez zakłócenia w transmisji,
- zaburzenie współpracy może wynikać z ograniczeń możliwości realizacji, gdy zamiar nie może być wykonany w sposób gwarantujący powodzenie (np. nadmierne opóźnienie działania agenta przy konieczności synchronizacji czasowej, wykonanie zadania cząstkowego agenta na poziomie niższym niż konieczny),
- podczas współpracy człowieka z agentem technicznym podstawowym problemem jest sama ocena intencji.



Rys. 7.6. Zobrazowanie współpracy pomiędzy agentami

Uzyskanie obrazu agenta na podstawie informacji pośrednich wymaga analizy zachowania agenta uwidocznionego w obrazie uzyskiwanym z czujników. Dodatkowo możliwe jest uwzględnienie interakcji, czyli analizy sposobów reakcji agenta j na działania agenta k .

Ważną cechą agenta jest zdolność komunikacji. Typowo techniczne podejście do przekazu informacji polega na wymianie komunikatów o określonej strukturze, z jednoznacznie określoną zawartością informacyjną. Ponieważ z wymianą informacji wiążą się formy zachowań w stosunku do innych agentów podobne do obserwowanych w społecznościach (*social behavior*), pojawiają się zatem koncepcje innych form przekazu informacji, wynikające z realizacji i interpretacji zachowań. Nabycie umiejętności określonych zachowań jest możliwe w efekcie uczenia. Prowadzone są zatem prace nad robotami naśladowującymi zachowania człowieka, np. z zakresu nakierowywania uwagi, gdzie agent na podstawie obserwacji człowieka nauczył się zachowań podobnych do ludzkich [51]. Przy uczeniu zachowań agentów mogą być stosowane metody uczenia ze wzmacnianiem [51, 56], co pozwala na utworzenie modelu sterowania bez konieczności poszukiwania algorytmu sterowania w postaci jawnej.

Znaczenie modelu wewnętrznego, współpracującego agenta znalazło odzwierciedlenie w dwóch eksperymentach opisanych w publikacji [142]. W pierwszym eksperymencie porównywano sterowanie przez człowieka wspólnie z robotem (agentem), gdy odbywało się ono bez wiedzy o współpracującym agencie oraz z tą wiedzą. Wskaźnikiem jakości był czas osiągnięcia celu. Rozkłady wartości wskaźnika jakości świadczą o ułatwieniu sterowania w sytuacji możliwego przewidywania działania agenta. W drugim symulacyjnym eksperymencie człowieka zastąpił agent programowy, który zawierał uczącą się sieć neuronową. Zadaniem sieci było nauczenie się współdziałania z robotem. Uzyskane wyniki, obejmujące zarówno czas osiągnięcia celu, jak i trafność działania, pokazały znaczną poprawę w miarę postępu procesu uczenia.

Interesującym zagadnieniem jest współdziałanie agenta technicznego (sprzętowego bądź programowego) z człowiekiem. Przykładem jest zaprezentowane w pracy [78] wspólne wykonywanie zadań typu sterowanie i dowodzenie przez dwóch operatorów, z których jeden był człowiekiem albo środowiskiem programowym R-CAST. Stwierdzono poprawę jakości realizacji zadań przy współpracy z systemem technicznym w stosunku do współdziałania ludzi.

Warunkiem powodzenia koncepcji realizacji zadań przez zespoły latających (i nie tylko) obiektów bezzałogowych jest opracowanie sposobu komunikacji i podziału zadań. Nie jest to zagadnienie banalne, o czym świadczy wielość różnorodnych propozycji. W pracy [233] zaprezentowano koncepcję poszukiwania optymalnego, która cechuje się jednak znaczną złożonością obliczeniową. W pracach [53, 249] dla zadania detekcji celów współpracę zespołu uzyskano przez wykorzystanie koncepcji feromonów i antyferomonów.

Szczególną uwagę warto zwrócić na koncepcje zaprezentowane w pracy [66]. W opisie systemu wprowadzono specyficzny język, który jest wykorzy-

stwywany do uzgadniania sposobu realizacji zadania, a więc przydział zadań składowych odbywa się przez dialog mający formę aukcji. Szczególnie interesujące jest to, że na poziomie elementów systemu także wprowadzono strukturę agentową, tworząc odpowiednich agentów do następujących zadań:

- obsługi interfejsów (*interface agent*),
- obsługi procesu przydziału zadań (*delegate agent*),
- realizacji zadania (*execute agent*),
- obsługi systemów (*resource agent*).

Systemy wspomagające działania człowieka podczas sterowania pojazdami różnego rodzaju (jak asystent nagłego hamowania w samochodach [148], asystent parkowania, asystent zmiany pasa ruchu) można opisać w koncepcji współpracy agenta technicznego z człowiekiem. Agent ten przewiduje intencje człowieka i odpowiednio modyfikuje sygnał sterujący. Warto zauważyć, że wspomniane przykłady są stosunkowo nieskomplikowanymi modyfikacjami sygnału sterującego w efekcie analizy jednej lub kilku zmiennych, czyli sygnałów sterujących. Pełniejsza ocena stanu człowieka potencjalnie umożliwia dostosowanie systemu sterowania do jego aktualnych potrzeb, ale także może być elementem diagnozującym niebezpieczeństwo wynikające czy to z błędów, czy z działania jakiegoś czynnika pogarszającego sprawność psychofizyczną człowieka.

Wykorzystanie koncepcji systemu agentowego podczas realizacji zadań jest przyszłościowym kierunkiem sterowania zespołami samolotów i pojazdów bezałogowych. Formułowanie zadań dla tego typu systemów może polegać na określeniu ogólnego celu, a realizacją tego celu zajmuje się system złożony z elementów, które równocześnie są autonomiczne i potrafią współpracować przez definiowanie zadań, przydział zadań cząstkowych zależnie od aktualnej sytuacji i realizację zadań przydzielonych każdemu agentowi. Pracą z tego zakresu jest publikacja [16], gdzie system agentów heterogenicznych (samolotów bezałogowych) jest wykorzystywany do realizacji zadań we współpracy z człowiekiem – pilotem samolotu (może to być także operator SKL), który steruje formacją. Proponowane jest także wykorzystanie roju aparatów bezałogowych w zadaniach rozpoznawania celu [54].

Istotną dziedziną, w której stosuje się systemy wieloagentowe, jest wykorzystanie rozproszonych detektorów czy czujników pomiarowych w aplikacjach typu rozproszony system diagnostyczny (np. prace [36, 116]) czy zespołowa realizacja zadania przeszukiwania (np. prace [17, 53]). Istotnym zagadnieniem jest tutaj rozdział zadań uwzględniający zgodność rozwiązania lokalnego z globalnym oraz wiarygodność konkluzji poszczególnych agentów.

Z systemami agentowymi wiąże się pojęcie **rozproszone rozwiązywanie zadań** (*distributed problem solving*). Jest to pojęcie węższe, w którym agent jest zdeterminowany przez strukturę konstruowaną dla danego celu nadrzędnego. Struktura definiuje sztywne powiązania, które odpowiadają podziałowi zadania głównego na zadania składowe. Każde z tych zadań jest rozwiązywane przez

określoną jednostkę przetwarzającą. Struktury są dobierane do konkretnego zadania, co oczywiście oznacza mniejszą elastyczność, jednak powstały system jest przewidywalny i wszystkie jednostki (agenci) mają ściśle określone zadania w ramach wspólnego celu.

Ogólnie, w systemach wieloagentowych struktura, a tym samym podział zadań, mogą wynikać z aktualnie wybranych celów, a te mogą być zmienne. Problemem może być także niestabilność całego systemu, co jest tym większym zagrożeniem, im większa jest autonomia agentów, a co za tym idzie – elastyczność organizacji systemu. Właściwości systemu agentowego w dużym stopniu zależą od przyjętych mechanizmów negocjacji pomiędzy agentami.

Technologicznym aspektem koncepcji rozproszonego rozwiązywania zadań jest przyspieszenie realizacji zadań przez wykorzystanie równoległe działających jednostek obliczeniowych. Innym ważnym aspektem jest czytelna i łatwa do weryfikacji struktura. Modele zadań składowych są prostsze w opisie niż model całościowy. Wyniki cząstkowe są następnie agregowane w wynik końcowy.

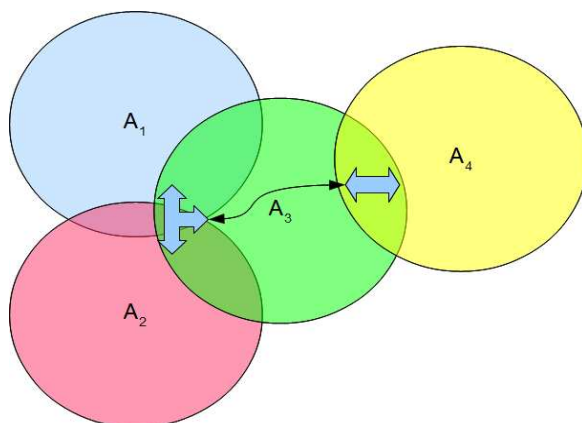
Podsumowując zebrane informacje o systemach wieloagentowych, należy zauważyć, że dziedzina ta obejmuje rozległy zakres zagadnień. Wielość zagadnień, częściowo wspólnych, a częściowo specyficznych dla danych zastosowań, wymusza prowadzenie badań w tej dziedzinie, zwłaszcza że jest to przyszłościowy sposób rozwiązywania wielu zadań występujących w różnych systemach i opisu zjawisk obejmujących współpracę mniej lub bardziej autonomicznych elementów systemów zarówno społecznych, technicznych, jak i mieszanych.

7.3.3. Zespołowa świadomość sytuacyjna

W systemach wieloagentowych, zespołach ludzkich i zespołach mieszanych pojawia się pojęcie zespołowej świadomości sytuacyjnej [8, 149, 243, 250, 265, 270]. Istnieje tu analogia pomiędzy modelem wewnętrznym otoczenia tworzoną przez człowieka a modelami wewnętrznymi innych agentów i obrazem otoczenia w systemie technicznym. Niestety, próby dokładniejszego opisu nie doprowadziły do powstania jednolitego modelu zespołowej świadomości i co więcej – prezentowane przez różnych badaczy koncepcje nie są spójne [243]. O ile pierwotnie zespołową świadomość sytuacyjną [72] opisywano z wykorzystaniem modelu lokowanych zasobów informacji, to przyjęcie możliwości rozproszenia informacji w zespole [8] tłumaczy silniejszy niż liniowy wzrost efektywności w pracy zespołowej.

Na rysunku 7.7 przedstawiono schematycznie to zagadnienie dla zespołu składającego się z czterech agentów. Zakładając, że świadomość sytuacyjna zespołu wynika z sumy komponentów dla każdego agenta oraz części wspólne są istotne dla prawidłowości współpracy, otrzymuje się znany w literaturze model z trzema agentami (tu A_1 , A_2 i A_3).

Wprowadzenie czwartego agenta, który nie jest bezpośrednio połączony z agentami A_1 i A_2 , uświadamia, że podczas pracy zespołowej ocena świadomości sytuacyjnej musi uwzględniać dodatkowy czynnik współpracy.



Rys. 7.7. Zobrazowanie zespołowej świadomości sytuacyjnej

Stwierdzenia zawarte w pracy [265], poparte eksperymentami, precyzują w pewnym stopniu podane wcześniej zagadnienia. W świadomości sytuacyjnej zespołu należy wyróżnić:

- świadomość każdego z członków zespołu, której poziom powinien być odpowiedni dla realizowanego przez niego zadania,
- świadomość ogólna zespołu i struktura zespołu powinny pokrywać całość problemu,
- istotnym elementem jest świadomość stanu zespołu (metaświadomość) każdego członka zespołu, gdyż ten czynnik warunkuje prawidłowość współpracy.

Okazało się, że na efektywność działania nie ma wpływu współdzielona z innymi wiedza. Istotniejsze jest natomiast, aby w świadomości każdego znalazł się ogólny obraz struktury zespołu, jak również powiązania ze współpracownikami. Te powiązania są konieczne do prawidłowej wymiany informacji, co łączy zadanie cząstkowe z zadaniem całościowym. Mimo braku możliwości lokalizacji świadomości dla konkretnego członka zespołu, dobrze zorganizowany zespół jako całość ma odpowiednią świadomość sytuacyjną [8].

Świadomość podczas pracy zespołowej wiąże się z dwoma rodzajami aktywności [243]:

- aktywnością wynikającą z realizacji zadania (*taskwork*),
- aktywnością konieczną do współdziałania w zespole (*teamwork*).

Na świadomość zespołu wpływają także czynniki dotyczące wymiany informacji. Zapewnienie prawidłowego przepływu informacji pozwala na rozproszenie jej w zespole bez utraty całościowej świadomości zespołu.

Nieco inne wnioski wynikają z badania zaprezentowanego w pracy [270], dotyczącej oceny świadomości sytuacyjnej zespołów w symulowanej walce powietrznej. Stwierdzono tutaj negatywny wpływ różnicy w poziomie wykształcenia na świadomość sytuacyjną zespołu i efektywność działania. Ścisła współpraca w realizacji wspólnego zadania oraz konieczność uwzględnienia możliwości zmian przydziału zadań cząstkowych stawiają więc inne wymagania niż gdy istnieje możliwość rozdzielenia zadań o różnej specyfice.

Interpretując zaprezentowane wyniki, należy zwrócić uwagę na różnicę dotyczącą powiązania agentów podczas realizacji zadania. Gdy powiązanie w zadaniach jest luźne, tzn. współpraca agentów odbywa się bez konieczności synchronizacji działań, wspólny zakres świadomości jest ograniczony do wymiany informacji na etapie uzgadniania zadań i przekazywania wyników, a niezbędne do realizacji zadania informacje są podzbiorem wszystkich informacji dotyczących zadania całościowego. Przy silnym powiązaniu warunkiem prawidłowej współpracy jest nie tylko świadomość niezbędna do wykonywania własnego zadania, ale także świadomość co do działań i intencji współpracowników. O ile w pierwszym przypadku następuje zawężenie zbioru informacji wykorzystywanych podczas realizacji zadania cząstkowego, to w drugim (mimo podziału zadania całościowego) może nastąpić nawet zwiększenie wielkości tego zbioru. Ponieważ nowe elementy zbioru informacji dotyczą współpracownika, to podobny poziom umiejętności i nawyków ułatwia uzyskanie odpowiedniej świadomości co do jego działań. Wynika z tego wniosek, że dla zastosowań, w których istnieje konieczność przejmowania realizacji zadań składowych przez innych członków zespołu (z taką sytuacją ma się do czynienia w lotach z załogą dwuosobową, a skrajnym przypadkiem są zadania militarne, kiedy należy być przygotowanym na straty i konieczność zmiany przydziału zadań), świadomość sytuacyjna każdego z członków zespołu musi obejmować, poza elementami związanymi ze współpracą, także elementy niezbędne do włączenia się w wykonywanie zadania realizowanego przez innych. Wnioski z eksperymentu dotyczącego walki powietrznej słusznie wskazują w takiej sytuacji na korzystny wpływ podobnego poziomu wiedzy i umiejętności poszczególnych zespołów agentów homogenicznych.

Asystent pilota może przejąć część odpowiedzialności za sterowanie samolotem (czyli pozwala pilotowi na zmniejszenie zakresu obserwowanych i analizowanych zmiennych stanu), lecz zgodnie z przeprowadzoną analizą może powodować konieczność odbioru i analizy dodatkowych zmiennych koniecznych do realizacji zadań w zespole. Asystent reagujący w określonych sytuacjach, zachowujący się w sposób przewidywalny, nie powinien zwiększać obciążenia zadaniami współpracy. W efekcie dialogu możliwe jest nabywanie przez pilota umiejętności kojarzenia zjawisk i ich skutków. Asystent wykazujący błąd pilota działa jako krytyk, który nie tylko ocenia sytuację, ale także sposób i skutki działania pilota. Warunkiem przekazania umiejętności oceny stanu jest prezentacja informacji obrazująca przyczynę reakcji asystenta.

7.3.4. Asystent pilota jako system wieloagentowy

Współpraca dwóch bardzo różniących się elementów, jakimi są człowiek i system techniczny, stanowi duże wyzwanie. Wprowadzenie opisu współpracy jako systemu agentowego heterogenicznego pozwala na zaprezentowanie ogólnej struktury powstałego systemu, wykorzystując analogie pomiędzy modelem sytuacyjnym a obrazem stanu innych agentów oraz procesami przetwarzania informacji przez człowieka i przez agenta.

Realizacja asystenta jako systemu wieloagentowego wynika z przydziału zadań do realizacji autonomicznym jednostkom. Każdemu zadaniu cząstkowemu, które ma realizować asystent pilota (sterowanie, kształtowanie charakterystyk interfejsów oraz układów sterujących, analiza stanu, generowanie wartości dla wskaźników, ocena ważności informacji i wybór, co i jak prezentować), zostaje przypisany agent. Dzięki takiemu podejściu następuje strukturalne wyodrębnienie zadań cząstkowych, rozwiązanie każdego z tych zadań indywidualnie i określenie związków pomiędzy zadaniami cząstkowymi. Elementami łączącymi agentów podczas realizacji zadań są modele wewnętrzne, które każdy z agentów wykorzystuje do opisu stanu innych agentów.

Ogólna idea systemu agentowego nie precyzuje tego, jak działają poszczególne elementy systemu (agenci), a w szczególności, jak jest realizowany przydział zadań i kooperacja. W zadaniach o krytycznym znaczeniu dla bezpieczeństwa zarówno sposób realizacji, jak i rozwiązania na poziomie struktury systemu muszą być przewidywalne i weryfikowalne. Znacznym ułatwieniem w ocenie tego, jak w różnych sytuacjach zachowa się system, jest przyjęcie sztywnej struktury realizacji zadań. Przez sztywną strukturę w koncepcji agentowej należy rozumieć taką realizację, w której sposób działania każdego z agentów oraz to, jak współpracuje z innymi, jest jednoznacznie określony. Sztywną strukturą będzie także taka, w której następują algorytmiczne zmiany trybów skutkujące przewidzianą na etapie projektowania rekonfiguracją, w odróżnieniu od takich mechanizmów wykorzystywanych w systemach wieloagentowych, jak tworzenie koalicji czy konkurowanie. Warto jednak zwrócić uwagę, że o ile w rozwiązaniach technicznych (a więc dotyczy to wewnętrznej struktury asystenta) jest możliwa realizacja struktury sztywnej, to współdziałanie w załodze składającej się z pilota lub pilotów oraz asystenta będącego układem technicznym z natury swojej wiąże się ze zmianami struktury systemu jako całości.

Podstawową cechą asystenta różniącą go od dotychczasowych rozwiązań jest wprowadzenie elementów dokonujących oceny intencji pilota. Ocena intencji służy do:

- określenia, jak interpretować sygnały sterujące,
- oceny skutków działań pilota oraz oceny stanu samolotu w kontekście działań pilota.

Interpretacja sygnałów sterujących zależna od oceny intencji (czyli od stanu modelu wewnętrznego w części odzwierciedlającej stan pilota) służy do wyboru

sposobu kształtowania samych sygnałów sterujących oraz zmiany struktury sterowników. Rozdzielenie funkcji oceny stanu i określania reakcji prowadzi do dwóch rodzajów agentów:

- agent oceniający,
- agent działający.

Uwzględnienie ocen cząstkowych w ocenie całościowej (pkt 4.3.2) implikuje wprowadzenie agentów wypracowujących diagnozę całościową stanu z wykorzystaniem efektów pracy innych agentów. Ponieważ jednak na etapie oceny całościowej istotny jest kontekst sytuacyjny, to należy wprowadzić cztery zadania:

- określenie i ocenę celu działania,
- ocenę efektów sterowania,
- ocenę stanu systemu i otoczenia,
- ocenę intencji pilota (a ogólniej ocenę stanu pilota).

Efektom oceny stanu jest diagnoza, którą można przełożyć na ostrzeżenie oraz działanie. W sytuacjach krytycznych często konieczna jest szybka i odpowiednia do zaistniałej sytuacji reakcja. W wielu sytuacjach nie jest konieczne ostrzeganie człowieka, który sam prawidłowo ocenia sytuację (np. stwierdza konieczność zatrzymania pojazdu, przerwania procedury lądowania i szybkiego oddalenia się od powierzchni Ziemi), lecz wspomaganie prawidłowej realizacji działania. Dużym ułatwieniem w interpretacji jest wykorzystywanie przez człowieka ekstremalnych wartości bądź szybkich zmian sygnałów zadawanych. Takim sygnałem jest gwałtowny ruch sterownicą, szybkie wciśnięcie pedału lub osiągnięcie wartości granicznych, gdyż sprowadza proces oceny intencji do reakcji na odpowiedni bodziec. Jeśli natomiast intencje (oczywiście w ocenie agenta) są niezgodne z oceną stanu (także realizowaną przez agenta), to ma się do czynienia z nierozstrzygniętym dylematem, czy przekazać ostrzeżenie, czy wygenerować reakcję.

Ocena stanu pilota może obejmować nie tylko efekty sterowania, ale także ogólny stan psychofizyczny oraz aktualną świadomość sytuacyjną [62]. Możliwość oceny stanu człowieka (obejmującej stan ogólny, obciążenie, nakierowanie uwagi) jest wskazywana jako istotny czynnik dla prawidłowości wspomagania [148].

Dostępność planu lotu upraszcza ocenę poprawności celu i sposobu sterowania. W pracy [237] wśród wielu elementów systemu wspomagania pilota (dla małego lotnictwa w ramach programu SATS) został opracowany klasyfikator segmentu lotu (*flight segment interpreter*), który został zrealizowany na podstawie logiki rozmytej. W zależności od aktualnego segmentu oceniana jest poprawność sterowania z zakresu czterech grup reguł:

- nawigacyjnych – związanych z trajektorią przez określenie obszaru dozwolonego,
- prędkościowych – obejmujących prędkość powietrzną oraz pionową zależnie od rodzaju samolotu oraz trajektorii,

- związanych z ruchem lotniczym (unikanie kolizji),
- proceduralnych (ocena prawidłowości realizacji procedur lotniczych).

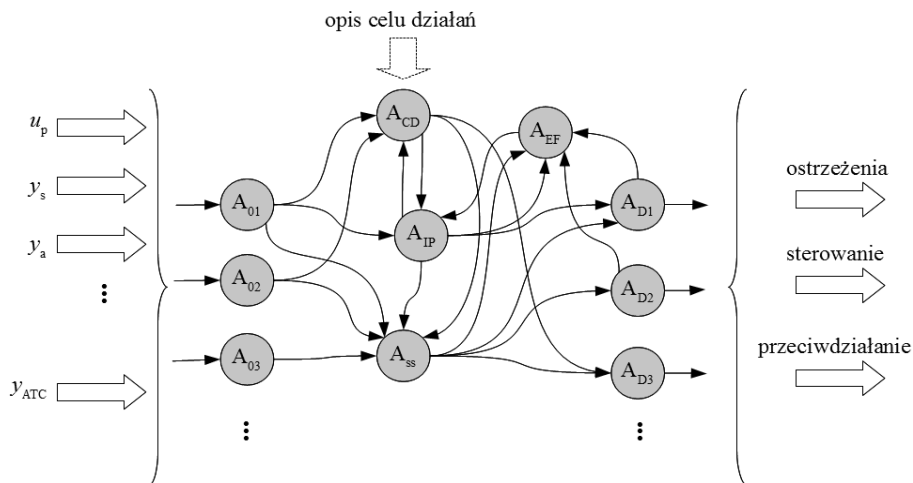
Proponowane rozwiązanie ma umożliwić realizację rozproszonego systemu kontroli ruchu lotniczego dla małych samolotów.

Inna propozycja kompleksowego systemu kontroli w ruchu lotniczym składa się z trzech komponentów [277]:

- agenta oceniającego niepoprawne zachowania w ruchu lotniczym (naziemny),
- agenta oceniającego stan samolotu z uwzględnieniem predykcji,
- agenta monitorującego pilota.

Na uwagę zasługuje sposób monitorowania pilota. Wykorzystuje się tutaj porównywanie wzorców zachowań i na tej podstawie wnioskuje o błędach w działaniu i utracie świadomości sytuacyjnej.

Ogólną strukturę systemu wieloagentowego o strukturze hierarchicznej obrazuje rys. 7.8. Przedstawiony przepływ informacji jest pewną szczególną realizacją. W ogólności każdy agent ma dostęp do wszystkich informacji dostępnych z układów, z którymi współpracuje (sygnałów sterujących u_p , zmiennych mierzonych y , obejmujących stan procesów dynamicznych, stan otoczenia, informację o ruchu lotniczym, opis celu działania, jeśli jest przekazywany np. przez FMS) oraz do tych przekazywanych przez innych agentów. Wykorzystanie informacji wynika z potrzeb realizacji określonego zadania. Przy sztywnej strukturze na etapie projektowania wymagane jest określenie niezbędnych powiązań kształtujących strukturę i format przepływu informacji.



Rys. 7.8. System wspomagający wieloagentowy

Proponowana struktura zawiera następujące elementy:

A_{Oi} – agenci analizujący wybrane charakterystyki stanu (pkt 4.3.2),

A_{SS} – agent oceniający całościowo stan i określający sposób działania wynikający z tego stanu,

A_{Di} – agenci realizujący działania (sterowanie automatyczne, generowanie informacji, sterowanie aktywnymi organami sterowymi),

A_{CD} – agent określający cel i oceniający realizację celu,

A_{IP} – agent oceniający intencje i stan pilota,

A_{EF} – agent oceniający efektywność działań.

Aktywowanie agenta określającego cel sterowania zależy od istnienia takiej informacji. Cel może być określony na poziomie ogólnym jako końcowy punkt trasy (lotnisko) lub kilka lokalizacji, w których powinien się znaleźć samolot. Dokładne określenie celu odbywa się przez podanie trajektorii trasy. Ocena realizacji celu, uwzględniając poziom dokładności opisu, kształtuje charakterystyki funkcji przynależności w zbiorze μ_e (zależność (3.29)).

Ocena stanu pilota poszerza funkcjonalność adaptacji sterowania. Stwierdzenie braku działania mimo jego konieczności prowadzi do konkluzji, że pilot nie radzi sobie ze sterowaniem. W tej sytuacji możliwe jest przełączenie systemu w tryb sterowania automatycznego i ignorowanie sygnałów z organów sterowych¹¹. Zakładając jednak, że nieprawidłowe działanie jest efektem przemijającym, reakcja systemu przez aktywne organa sterowe stanowi wystarczające ostrzeżenie dla pilota.

Ocena efektywności działań jest elementem oceniającym, czy podjęte przez poszczególnych agentów działania powodują redukcję poziomu zagrożenia. Agent ten współpracuje z agentem oceny pilota, określając, czy pilot reaguje na sygnały z systemu.

7.4. Struktura asystenta pilota z aktywnymi organami sterowymi

7.4.1. Opis asystenta pilota

Za ilustrację asystenta posłuży zaprezentowany, opracowany w ramach projektu, eksperymentalny system wspomagający pilota, wykorzystujący aktywne organa sterowe [221]. Przy projektowaniu asystenta szczególną uwagę zwracano na aspekt współpracy człowieka z układami technicznymi, stąd konieczne było odmienne od typowego podejście do samego projektowania [213].

Ocena skutków działań pilota jest elementem nadzoru nad bezpieczeństwem lotu. Wynik oceny aktywuje elementy przeciwdziałające. Tymi elemen-

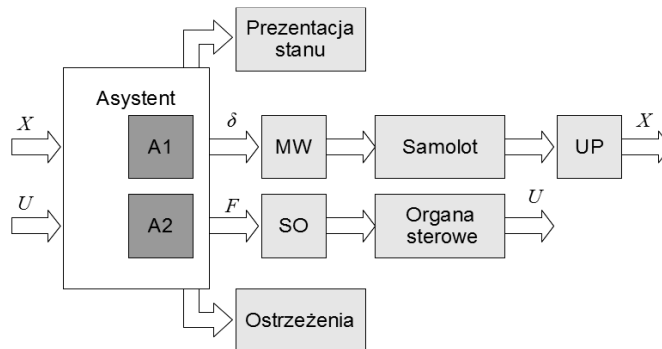
¹¹Mimo że realizacja takiej funkcji nie jest skomplikowana technicznie, to jej wprowadzenie w lotnictwie wiąże się z koniecznością opracowania procedur działania, oceny stanu prawnego i wykazania niezawodności systemu sterowania, w którym ta funkcja została wykorzystana.

tami są wskazania systemu ostrzeżeń, a w koncepcji aktywnych organów sterowych reakcje tych organów.

System składa się z kilku komponentów, pełniących określone funkcje. Każdy element może być traktowany jako agent, natomiast całość systemu funkcjonuje jako system wieloagentowy hierarchiczny o sztywnej strukturze. Ogólna struktura połączenia asystenta z samolotem i pilotem została przedstawiona na rys. 7.9. W skład asystenta wchodzi dwie grupy elementów:

A1 – elementy modyfikujące charakterystyki obiektu sterowanego,

A2 – elementy reagujące na stan, obejmujące sterowanie aktywnymi organami sterowymi (wektor F zawierający zmienne określające zadawane charakterystyki) oraz prezentację informacji o zagrożeniach.



Rys. 7.9. Asystent w strukturze sterowania samolotem z pilotem; MW – mechanizmy wykonawcze, SO – sterowniki aktywnych organów sterowych, UP – układy pomiarowe

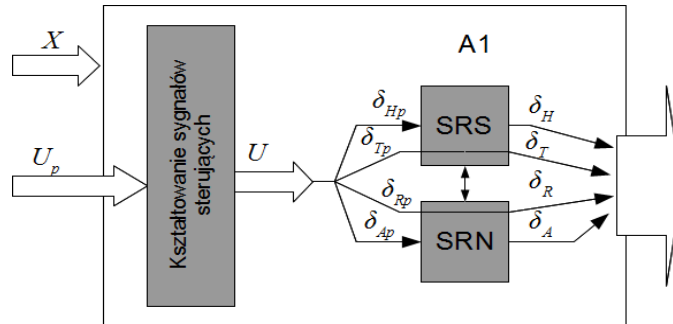
W części A1 zrealizowane zostały algorytmy modyfikujące charakterystyki oraz elementy modyfikujące wartości prezentowanych zmiennych lub rozszerzające zbiór tych zmiennych o zmodyfikowane wartości, zgodnie z metodyką opisaną w rozdz. 5. Struktura tej części została przedstawiona na rys. 7.10. Sygnały sterujące przekazywane przez pilota do systemu są wstępnie formowane. Funkcje formujące odzwierciedlają wartość informacji przekazywanej podczas sterowania.

Sygnał sterujący sterem kierunku δ_R jest przenoszony z orczyka lub wspomaga realizację prawidłowego zakrętu. Układ ten działa w dwóch trybach:

- 1) sterowanie bezpośrednio przez pilota,
- 2) sterowanie przez automat koordynatora zakrętu

$$\delta_R = \begin{cases} \delta_{Rp}; & |\delta_{Rp}| > \delta_0 & (1) \\ R(X_s)(t); & |\delta_{Rp}| \leq \delta_0 & (2) \end{cases} \quad (7.9)$$

Jest on przykładem realizacji koncepcji zmiennego poziomu wspomagania (pkt 5.7). Koordynator zakre \acute{t} u R jest operatorem wykorzystującym stan samolotu X_s , a w szczególności kąt przechylenia, prędkości kątowe przechylenia i odchylenia. Kąt ślizgu, gdy jest mierzony, może być także wykorzystany do poprawy jakości pracy koordynatora.



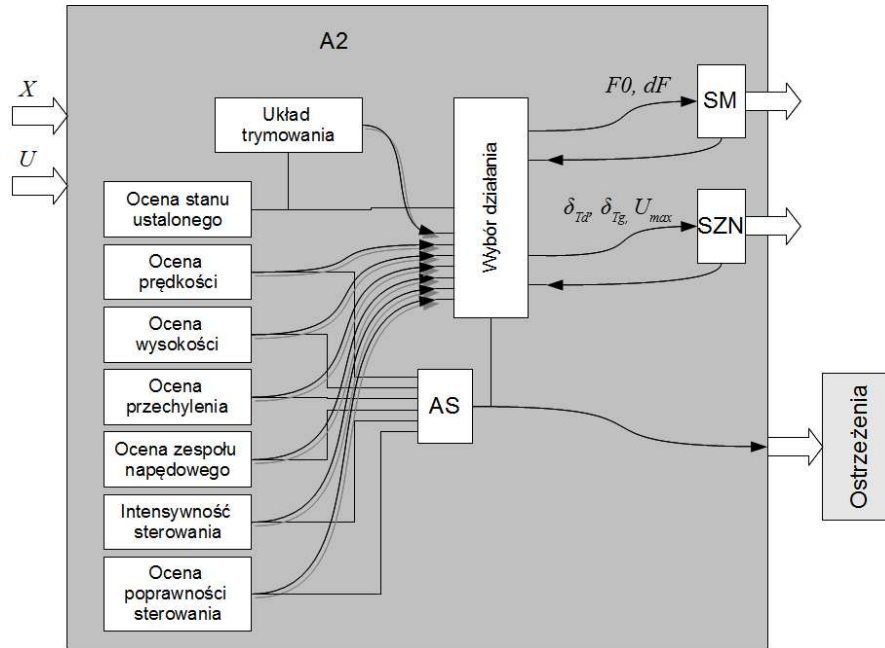
Rys. 7.10. Część A1 asystenta; SRS – sterownik dla ruchu symetrycznego, SRN – sterownik dla ruchu niesymetrycznego

Sygnaly sterujace zespołem napędowym są wyliczane na podstawie sygnału zadawanego przez pilota, zgodnie z zasadami opisanymi w pkt 5.7.2.

Sygnał δ_r przechodzi przez A1 bez modyfikacji. Takie podejście wynika wprost ze sposobu sterowania zespołem napędowym realizowanym przez A2 i zastosowania sterowania za pomocą jednej aktywnej dźwigni. W A2 sygnał δ_r jest interpretowany oraz wykorzystywany do sterowania siłą reakcji aktywnej dźwigni.

Część A2 asystenta składa się z agentów analizujących stan samolotu, stan otoczenia i sposób działania pilota oraz elementów sterujących aktywnymi organami sterowymi. Celem uzyskania prawidłowej świadomości sytuacyjnej asystent został wzbogacony o elementy informacyjne (panel ostrzeżeń – rys. 7.4, lub element wyświetlacza wielofunkcyjnego – rys. 7.38). Strukturę części A2 przedstawia rys. 7.11. Struktura asystenta odzwierciedla hipotetyczną strukturę przetwarzania informacji przez człowieka podczas podejmowania decyzji (rys. 3.7). Na rysunku 7.11 wyróżniono podstawowe elementy oceniające stan, które poza przekazywaniem informacji o wynikach oceny sugerują, jaka powinna być reakcja – czyli proponowane sterowanie.

Układ automatycznego trymowania określa, czy samolot znajduje się w stanie ustalonym i następnie steruje aktywną sterownicą w taki sposób, aby uzyskać zerową siłę reakcji dla obecnego położenia sterownicy. Dodatkowo agent ten określa aktualne parametry π samolotu, wykorzystywane przez układ kształtujący charakterystyki samolotu do wyboru optymalnego wzmocnienia (wzór (5.10)).



Rys. 7.11. Struktura części A2 asystenta; AS – analiza stanu pod względem bezpieczeństwa, SZN – algorytmy związane z pracą asystenta w sterowniku dźwigni sterującej i zespołu napędowego, SM – algorytmy związane z pracą asystenta w sterowniku sterowniczym

Układy oceny stanu zostały podzielone ze względu na zmienne stanu [143]. Nie jest to wymóg konieczny, jednak taki sposób oceny ułatwia prezentację wyników cząstkowych i ich interpretację przez pilota. Oceny prędkości i wysokości służą zabezpieczeniu przed doprowadzeniem do zakresu uznawanego za niebezpieczny. Ocena przechylenia pełni rolę pomocniczą dla pozostałych elementów oraz może służyć realizacji reakcji aktywnych organów sterowych dla dużych przechyleń.

Ocena stanu zespołu napędowego określa, czy zmienne opisujące stan silnika są w zakresie prawidłowym. Podstawowymi funkcjami tego elementu są detekcja przekroczenia dopuszczalnej prędkości obrotowej oraz ocena poziomu obciążenia silnika zespołu napędowego. Ocena intensywności sterowania jest elementem analizy stanu człowieka z uwzględnieniem zadania sterowania. Analiza sygnału sterującego i stanu samolotu pozwala na ocenę tego, jak pilot radzi sobie ze sterowaniem bieżącym. Po stwierdzeniu wystąpienia problemów i identyfikacji przyczyny następuje określenie działań korygujących, które obejmują charakterystykę siły reakcji aktywnych organów sterowych i charakterystyki systemu wskazań. Działanie tego elementu jest związane z wynikami analizy (pkt 6.2.4) i badania (pkt 6.2.5) wpływu zmiany charakterystyki siły reakcji na działanie człowieka.

Ocena poprawności sterowania dotyczy sposobu realizacji sterowania, czyli zarówno tego, jaki jest aktualny poziom automatyzacji, jak i określenia celu sterowania. Przy wysokim poziomie automatyzacji cel sterowania jest zwykle zadawany wprost. Podczas sterowania ręcznego realizowana jest predykcja stanu, z uwzględnieniem aktualnego sposobu sterowania i realizowanej fazy lotu. Ocena poprawności realizacji celu przez człowieka ogranicza się więc do sprawdzenia, czy procedury w ruchu lotniczym zostały wykonane poprawnie. Kolejnym elementem jest detektor zagrożenia powodowanego obiektami w przestrzeni i strefami zabronionymi.

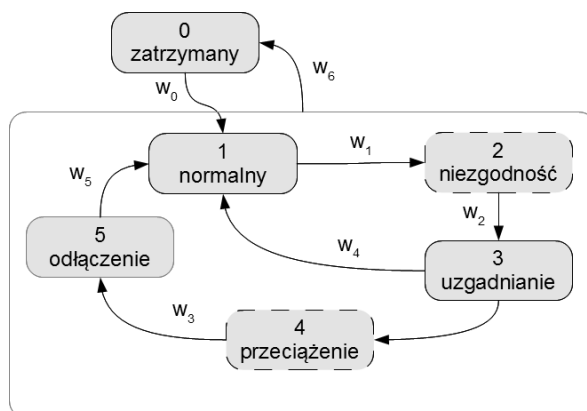
Wynikiem działania omówionych elementów jest informacja o poszczególnych nieprawidłowościach oraz zbiór proponowanych działań asystenta jako reakcja na te nieprawidłowości. Kolejny element asystenta proponuje sposób reakcji, oceniając stan globalnie na podstawie informacji cząstkowych dostarczanych przez pozostałe elementy. Wybrany sposób działania jest realizowany przez sterowniki aktywnych organów sterowych.

Dzięki zastosowaniu struktury agentowej rozbudowa systemu o kolejne elementy oceniające stan w szerszym zakresie sprowadza się do dołączenia kolejnych elementów. Możliwa jest także wymiana agenta po wprowadzeniu w nim poprawek lub poszerzeniu funkcjonalności.

Istotne dla prawidłowej współpracy jest określenie, jak asystent reaguje w sytuacji, gdy pilot nie akceptuje jego decyzji. Należy zwrócić uwagę, że sytuacja jest inna dla dźwigni sterującej zespołem napędowym niż przy sterowaniu siłami reakcji sterownicy. W przypadku sterownicy efektem niezgodnych zamiarów pilota i asystenta jest zwiększenie siły wymaganej do sterowania. Ten stan można uznać za pewne utrudnienie, które dotyczy utrzymania stanu niepoprawnego.

Konieczność aktywnego działania w celu utrzymania stałego położenia dźwigni sterującej zespołem napędowym jest nie tylko działaniem nienaturalnym, ale dodatkowo powoduje zwiększenie zbioru czynności realizowanych przez pilota i to zwykle w sytuacji trudnej. Aby uniknąć takiego efektu, działanie dźwigni dostosowano do formy dialogu.

Na rysunku 7.12 przedstawiono diagram stanów dźwigni. Warunki przejść pomiędzy stanami są następujące: w_0 – uruchomienie silnika, w_1 – rozpoczęcie działania sterownika dźwigni wywołane sygnałami T_d i T_g , w_2 – stwierdzenie niezgodności wartości aktualnej z wartościami ograniczającymi (stan 2. jest jedynie chwilowy, po nim następuje automatyczne przejście do stanu następnego), w_3 – stwierdzenie braku akceptacji przez pilota zadanych ograniczeń (stan 4. oznacza, że pilot przeciwdziała reakcji dźwigni), w_4 – przejście do stanu uznanego przez asystenta za poprawny (wynika z ruchu dźwigni wobec braku przeciwdziałania pilota), w_5 – podniesienie poziomu zagrożenia (oznacza zmianę sytuacji powodującą zwiększenie poziomu zagrożenia i skutkuje ponowną aktywacją możliwości przeciwdziałania). Istotne w dialogu jest przejście do



Rys. 7.12. Diagram stanów przy sterowaniu dźwignią zespołu napędowego

stanu 5., który oznacza akceptację zamiarów pilota przez asystenta i zaprzestanie przeciwdziałania.

7.4.2. Eksperymentalna weryfikacja funkcji asystenta

Opracowany sposób działania asystenta należy zweryfikować z udziałem człowieka. Badania muszą także objąć fazę strojenia charakterystyk asystenta wobec braku ścisłych modeli ilościowych opisujących działanie człowieka. Uzyskane wartości parametrów kształtujących reakcję są w znacznym stopniu wynikiem doświadczenia i intuicji, wymagają zatem eksperymentalnego sprawdzenia.

Celem ilustracji zostaną zaprezentowane wyniki prób sprawdzających dwie funkcje asystenta:

- kontrolę zakresu prędkości,
- kontrolę wysokości lotu.

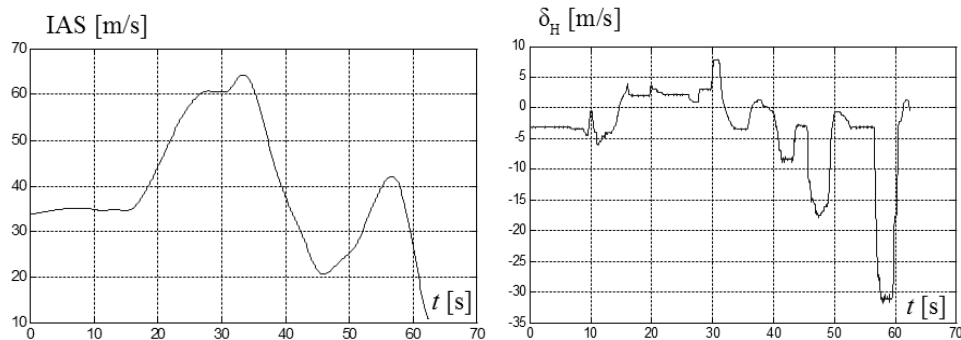
Podczas eksperymentalnej weryfikacji efektów działania aktywnych organów sterowych z zastosowaniem algorytmów kontroli przekroczeń osoba testująca celowo doprowadzała do sytuacji granicznych. Badania zostały wykonane na stanowisku badawczym opisanym w dodatku C. Zastosowanie symulatora umożliwiło celowe i bezpieczne doprowadzenie stanu samolotu do sytuacji granicznych i niebezpiecznych w zwykłym locie.

Sprawdzenie reakcji na przekroczenia dopuszczalnego zakresu prędkości lotu

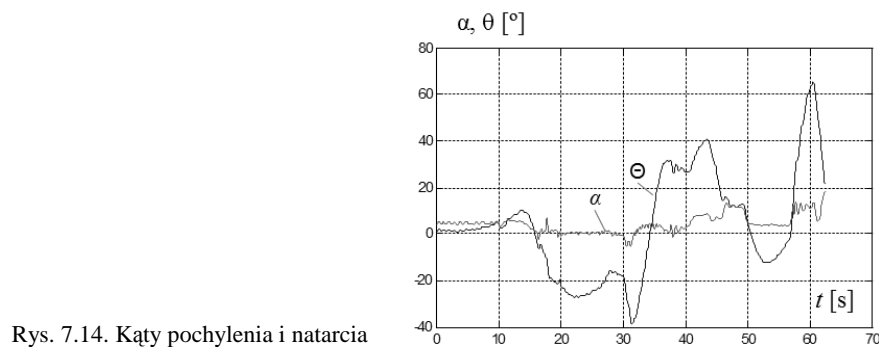
Pierwszy eksperyment zrealizowany bez wspomagania składał się z trzech etapów (rys. 7.13 i 7.14). Pierwszy etap rozpoczął się w 10 s, kiedy wysterowano zespół napędowy na 100% mocy. Następnie samolot dodatkowo rozpędzono przez pochylenie do lotu nurkowego. Po 30 s samolot przekroczył prędkość VNE (55 m/s).

Kolejny etap to wznoszenie z maksymalną mocą zespołu napędowego. Stroma trajektoria lotu spowodowała utratę prędkości. W sytuacji zaburzenia,

np. spowodowanego podmuchem, próba taka mogłaby się zakończyć doprowadzeniem do przeciągnięcia. Następny etap rozpoczął się w 55 s od maksymalnej redukcji mocy zespołu napędowego, a następnie sterowanie doprowadziło samolot do sytuacji przeciągnięcia, która zakończyła eksperyment. Wynikłe w trakcie realizacji próby sytuacje niebezpieczne w rzeczywistym locie mogą doprowadzić do wypadku.



Rys. 7.13. Prędkość lotu IAS i wychylenie steru wysokości δ_H podczas testu



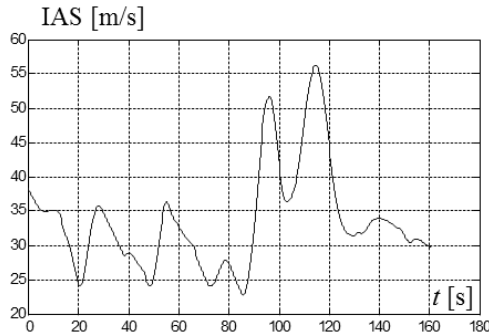
Rys. 7.14. Kąty pochylenia i natarcia

W kolejnym teście został załączony system ostrzegania za pomocą sprzężenia siłowego. Na rysunkach zaznaczono sygnały T_g i T_a , określające zakres położeń DZN uznanych przez asystenta za poprawne oraz poziom siły dF – określający położenie neutralne sterownicy i $F0$ – określający sztywność sterownicy. Wymuszona została sekwencja zdarzeń celem sprawdzenia działania systemu zabezpieczeń.

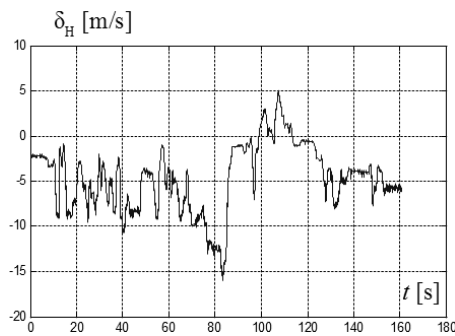
Pierwsza sytuacja to utrata prędkości, wynikająca ze zmniejszenia mocy zespołu napędowego (od 15 s). Pojawiły się dwie reakcje:

- przemieszczenie dźwigni sterującej zespołem napędowym (widoczne na rys. 7.17),
- zwiększenie siły na sterownicy (widoczne na rys. 7.18).

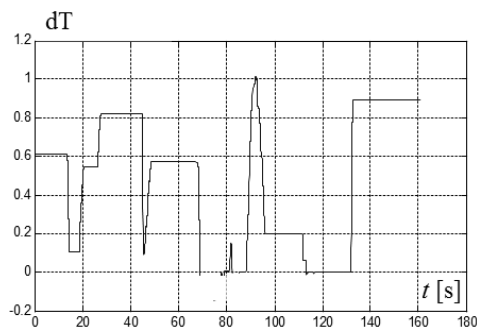
Ponieważ nie wystąpiło przeciwdziałanie ze strony człowieka (ok. 20 s, δ_H – rys. 7.16 i dT – rys. 7.17), to stan samolotu znalazł się na tyle szybko w zakresie prawidłowym (wzrost IAS – rys. 7.15, w efekcie pochylenia – rys. 7.19), że nie było konieczne pełne wysterowanie zespołu napędowego. Następnie doprowadzono ponownie do nadmiernego zmniejszenia prędkości, w efekcie czego nastąpiła kolejna reakcja systemu zabezpieczeń (ok. 45 s), podobnie jak poprzednio.



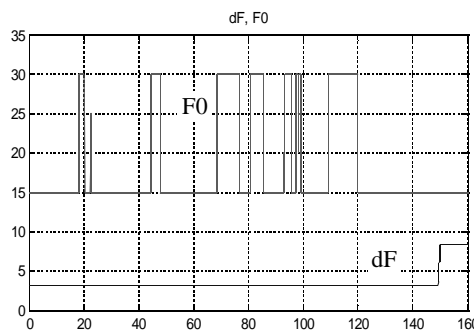
Rys. 7.15. Prędkość lotu podczas testu 1. z układem zabezpieczeń



Rys. 7.16. Wychylenia steru wysokości



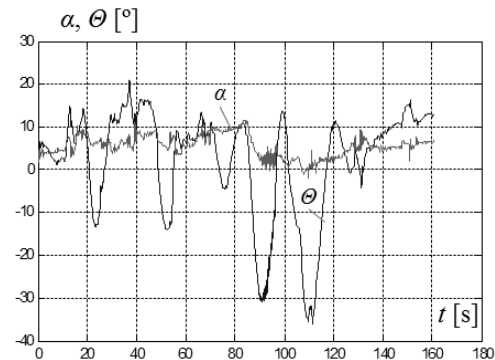
Rys. 7.17. Poziomy wysterowanie zespołu napędowego



Rys. 7.18. Reakcje systemu ostrzegania

Kolejna próba pokazuje sytuację, w której człowiek początkowo przeciwstawił się reakcji systemu. W przedziale czasu od 68 do 80 s nastąpiło przeciążenie dźwigni mocy, w efekcie czego system przestał oddziaływać na położenie dźwigni, aż do chwili osiągnięcia stanów poprawnych (chwilowo ok. 80 s). Ponieważ próba ta miała pokazać działanie w sytuacji, gdy człowiek nie akceptuje decyzji systemu, to dalszy przebieg obrazuje kolejną próbę przeciążenia systemu. Widać, że reakcja sterownicy początkowo polegała na powstrzymaniu kontynuacji sterowania skutkującego nadmiernym spadkiem prędkości lotu.

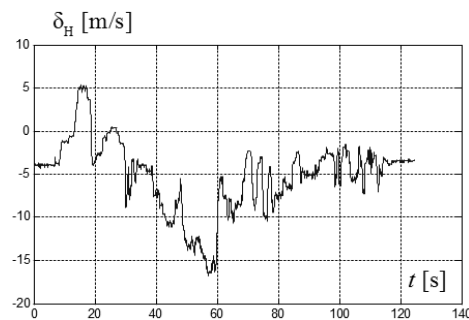
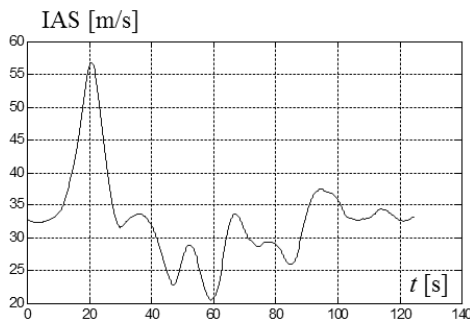
Jednak konsekwentne przeciążenie było możliwe. Należy pamiętać, że takie działanie wymaga dużej determinacji ze strony człowieka.



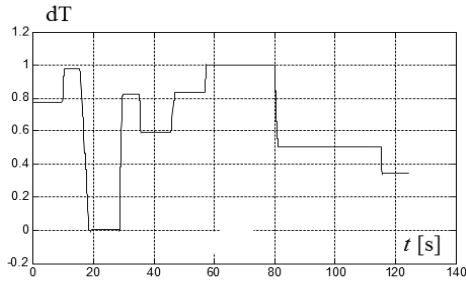
Rys. 7.19. Kąty pochylenia i natarcia

Następny test (rys. 7.20-7.24) obejmuje dwie próby, pokazujące sytuacje wymuszenia nadmiernej prędkości lotu przez wprowadzenie w stan lotu nurkowego. W pierwszej próbie następuje redukcja mocy zespołu napędowego (ok. 95 s). Reakcja dźwigni jest niewielka wobec uzyskania stanu lotu w miarę poprawnego. Pilot pogłębił jednak pochylenie samolotu. W efekcie zadziałania asystenta rośnie siła reakcji sterownicy (ok. 110 s), skutecznie przeciwdziałając rozprędzaniu.

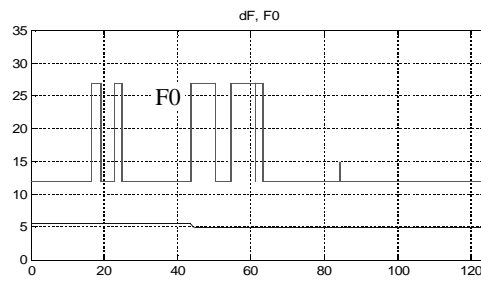
W drugiej próbie zrealizowano podobne sytuacje jak w pierwszej. Podstawową różnicą są chwilowe zmiany wychyleń steru wysokości, które doprowadziłyby do stanu poprawnego, system przestał więc przeciwdziałać. Ponieważ nastąpiło ponownie wymuszenie niepoprawnego sterowania, to system ponownie zareagował.



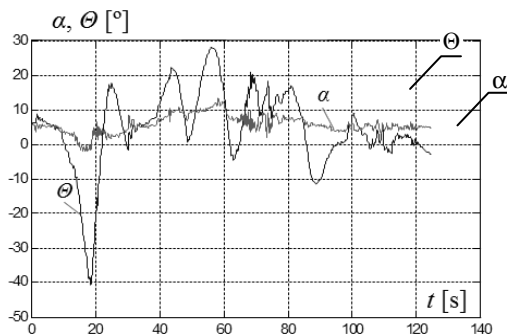
Rys. 7.20. Prędkość lotu podczas testu 2. Rys. 7.21. WychYLENIA steru wysokości z układem zabezpieczeń



Rys. 7.22. Poziom wysterowania zespołu napędowego



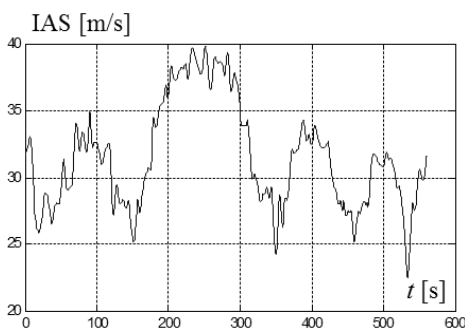
Rys. 7.23. Reakcje systemu ostrzegania



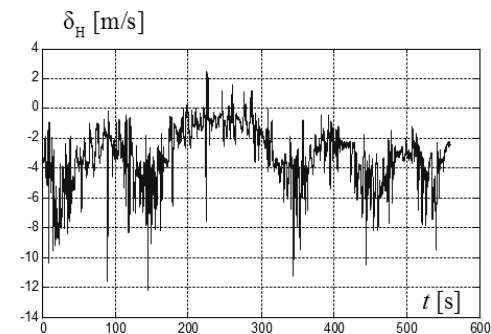
Rys. 7.24. Kąty pochylenia i natarcia

Zaprezentowane przykłady pokazują, że generalnie reakcja sterownicy zapobiega osiągnięciu stanu lotu spoza obszaru przyjętego w systemie jako bezpieczny, o ile pilot świadomie nie decyduje się na walkę z systemem zabezpieczeń.

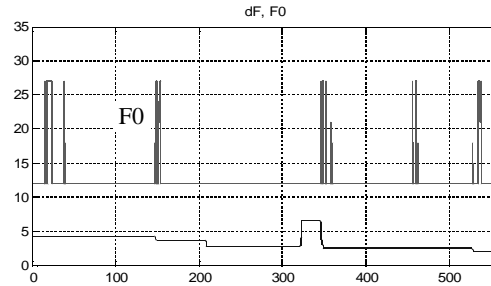
Poprzednie przykłady działania dotyczyły sytuacji skrajnych, co powodowało, że reakcje systemu nadzorującego były ekstremalne. Reakcje systemu podczas lotu spokojnego, lecz w pobliżu ograniczeń ilustrują wyniki kolejnego



Rys. 7.25. Prędkość lotu w czasie testu 3.



Rys. 7.26. Wychylenie steru wysokości w czasie testu 3.



Rys. 7.27. Reakcje systemu w przykładowym locie w czasie testu 3.

eksperymentu (rys. 7.25-7.27). Na rysunku 7.27 widoczne są krótkotrwałe działania w sytuacjach, kiedy podczas zamierzonych zmian prędkości lotu lub zmian nachylenia trajektorii następował nadmierny spadek prędkości lotu.

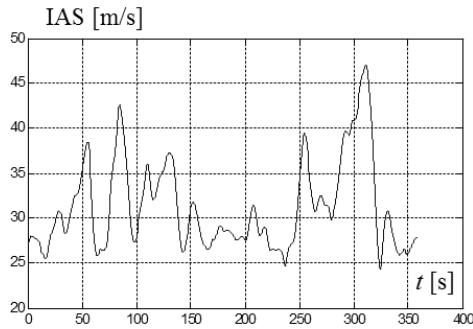
Sprawdzenie reakcji w przypadku nadmiernej bliskości powierzchni Ziemi

Jako kolejny przykład wykorzystania reakcji siłowej sterownicy i dźwigni sterującej zespołem napędowym zostaną zaprezentowane wyniki działania układu zabezpieczającego przed nadmiernym obniżeniem wysokości lotu. Lot testowy polegał na realizacji przelotu ze zmianami kursu, prędkości i wysokości, lecz bez ściśle zdefiniowanej trajektorii.

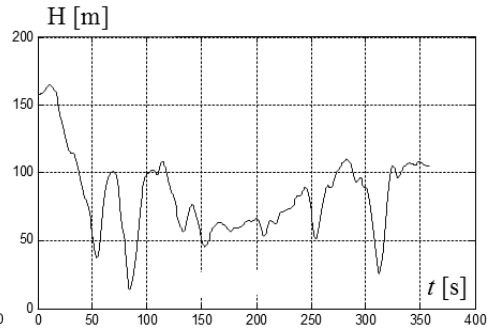
Wyniki uzyskane w przypadku działającego zabezpieczenia przed nadmiernym niżaniem oraz zabezpieczenia prędkości lotu w kilku sytuacjach przedstawiono na rys. 7.28-7.32. Przyjęto, że wysokość poniżej 100 m nad powierzchnią Ziemi będzie powodować reakcję systemu. Na początku testu samolot został sprowadzony na wysokość poniżej 100 m. Następnie pilot kilkakrotnie zmniejszał wysokość lotu, wywołując reakcję asystenta. Pierwsza reakcja po niżeniu poniżej 50 m (ok. 50 s) spowodowała, że samolot znalazł się na wysokości ok. 100 m. Drugie działanie pilota było szczególnie niebezpieczne, tzn. redukcja mocy zespołu napędowego i duże przechylenie ze niżaniem na małej wysokości. Asystent spowodował wznoszenie i zwiększenie wysterowania zespołu napędowego do maksimum. Wobec zaakceptowania tej decyzji przez pilota samolot został wyprowadzony na bezpieczną wysokość.

Przez okres od ok. 120 do 250 s pilot utrzymywał samolot poniżej 100 m ponad powierzchnią Ziemi, co powodowało, że asystent pozostawiał zwiększoną siłę reakcji przy położeniu neutralnym, aby samolot po puszczeniu sterownicy wznosił się z niewielką prędkością pionową.

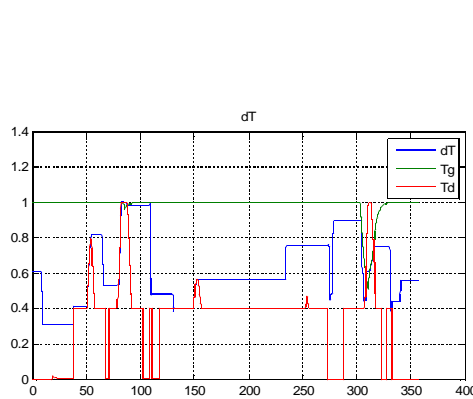
Po około 300 s zaistniała sytuacja stromego opadania ze znaczną prędkością, co wymusiło redukcję mocy zespołu napędowego i reakcję na sterownicy, a po zmianie stanu lotu na wznoszenie – ponowne zwiększenie mocy. Przebieg sygnału dF obrazuje wartości położenia sterownicy, które zamierza osiągnąć asystent.



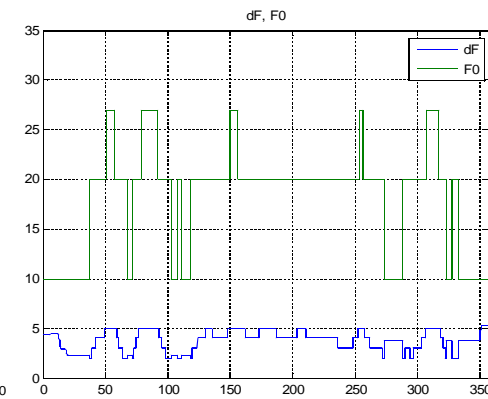
Rys. 7.28. Prędkość lotu



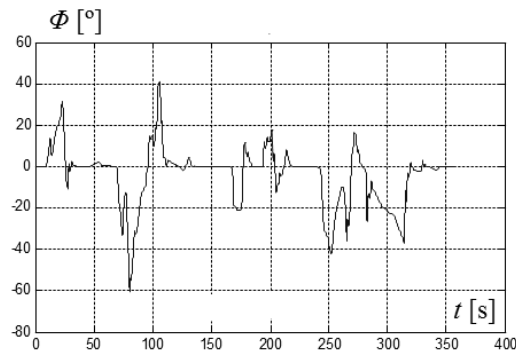
Rys. 7.29. Wysokość lotu w pierwszej fazie testu



Rys. 7.30. Sygnał sterujący zespołem napędowym

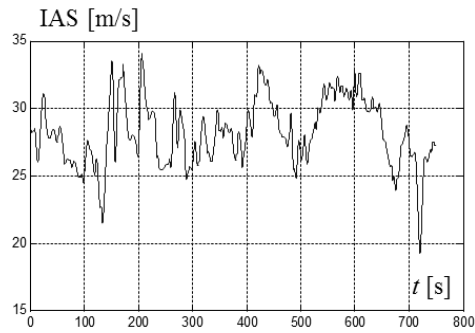


Rys. 7.31. Sygnały sterujące siłami sterowniczymi

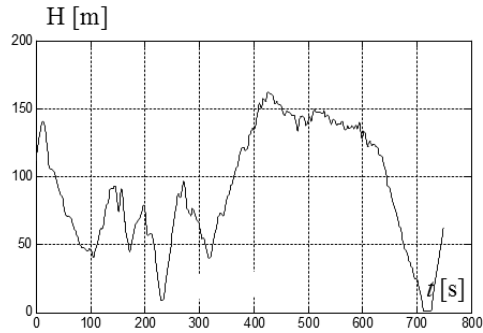


Rys. 7.32. Kąt przechylenia

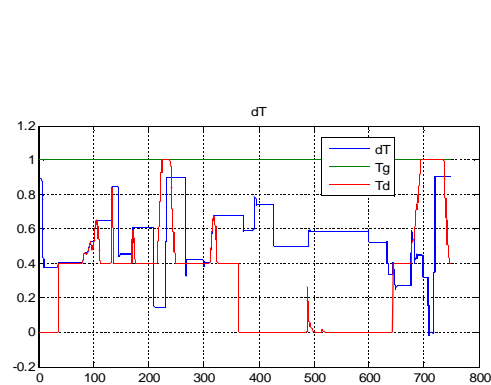
W kolejnym teście (rys. 7.33-7.37) po 200 s, podczas nadmiernego zniżania miało miejsce przeciążenie DZN przez pilota i nastąpiła redukcja mocy zespołu napędowego. Po chwili jednak pilot podjął prawidłowe decyzje o zwiększeniu mocy ZN, dzięki czemu nie nastąpił kontakt z Ziemią.



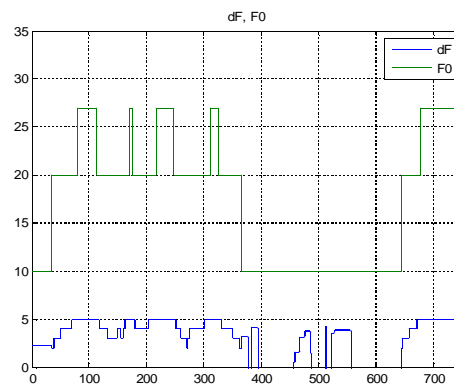
Rys. 7.33. Prędkość lotu



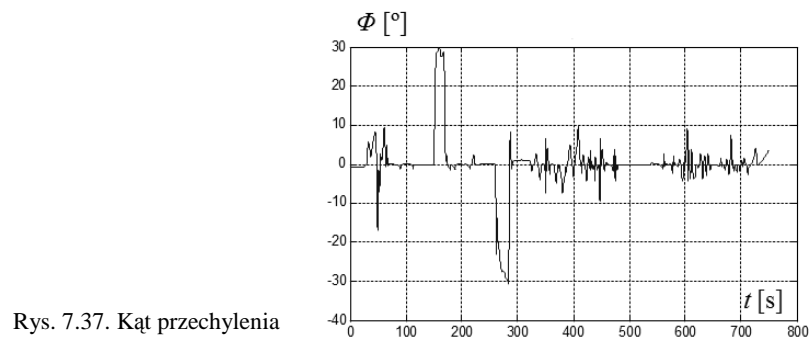
Rys. 7.34. Wysokość lotu w trzeciej fazie testu



Rys. 7.35. Sygnał sterujący zespołem napędowym



Rys. 7.36. Sygnały sterujące siłami sterowniczymi



Rys. 7.37. Kąt przechylenia

Drugie przeciążenie dźwigni, od ok. 650 s, wynika z decyzji człowieka o rozpoczęciu lądowania. Ponieważ w tym teście asystent nie został wyłączony ani wyposażony w funkcję wykrywania fazy lądowania, to pilot musiał przeciążyć dźwignię. Takie zachowanie asystenta jest oczywiście nieprawidłowe, jeśli

ładowanie odbywa się zgodnie z procedurą. Agent oceniający poprawność sterowania, analizując zamiary pilota i mając dostęp do informacji o lotnisku bądź lądowisku, ma możliwość automatycznego wykrycia fazy lądowania. Lądowanie w terenie przygodnym ze wspomaganie asystenta wymaga udziału człowieka w określaniu fazy lotu.

7.5. Interfejs informacyjny asystenta w koncepcji EID

7.5.1. Metodyka EID

Koncepcja środowiskowa kształtowania interfejsów – EID (*ecological interface design*) [299] jest propozycją rozwiązania interfejsów podczas sterowania złożonymi procesami (inspiracją było sterowanie elektrownią atomową). Jest ona wynikiem całościowego podejścia do rozwiązania zagadnienia. Podstawę teoretyczną metody stanowi teoria ekologiczna Gibsona [194], która wiąże postrzeganie z właściwościami obiektów (*affordance*), czyli tym, co można z nimi lub z ich wykorzystaniem zrealizować.

Projektowanie interfejsów tą metodą wywodzi się z zadań monitorowania złożonych procesów przemysłowych [33]. Aplikacje lotnicze dotyczą wskaźnika inżyniera pokładowego samolotu CC-130 Hercules Kanadyjskich Sił Zbrojnych [19], wskaźnika wspomagającego zachowanie w ruchu lotniczym [306], wskaźników tunelowych [5, 112, 295], systemu antykolidyjnego [113], organizacji zadań w kokpicie [262]. Proponuje się także zorganizowanie nadzoru nad działaniem systemu wieloagentowego zgodnie z tą metodyką [157].

Podstawowym założeniem w metodyce EID jest uwzględnienie powiązania człowieka ze środowiskiem, w którym realizuje swoje zadania. O ile w podejściu zorientowanym na człowieka, w budowaniu elementów, z którymi współpracuje, uwzględnia się ograniczenia z zakresu możliwości odbioru i przetwarzania informacji oraz możliwości działań, to w koncepcji EID rozwiązanie polega na takim ukształtowaniu środowiska, aby pracujący w nim człowiek miał jak najlepsze warunki do realizacji celu działania. Uwzględniając właściwości człowieka, zakłada się, że świadomość stanu procesu powinna nie tylko pozwolić na podjęcie działań odpowiednich do obecnej sytuacji (i to niekoniecznie działań standardowych – wyuczonych), ale także umożliwić radzenie sobie z sytuacjami, które są nowe i nieprzewidziane. Sposób kształtowania interfejsów wynika z przyjęcia możliwości realizacji zadań na różnym poziomie modelu SRK i konieczności zapewnienia odpowiedniej świadomości sytuacyjnej. Stąd podstawową cechą interfejsów informacyjnych EID jest taki sposób prezentacji, aby poza aktualnym stanem dostępne były informacje o powiązaniach i ograniczeniach otoczenia. Podstawowe cechy interfejsów, w zależności od poziomu działania, są następujące [19, 186, 293]:

- SBB – możliwość bezpośredniego operowania obiektami interfejsu,

- RBB – umożliwienie określenia zależności pomiędzy stanem a ograniczeniami środowiska,
- KBB – prezentacja stanu obrazująca strukturę środowiska, w którym realizowane jest sterowanie.

Projekty interfejsów rozpoczyna się od dekompozycji hierarchicznej modelu środowiska pracy (WDA – *work domain analysis*), w której wyróżnia się pięć poziomów abstrakcji – ADH (*abstraction-decomposition hierarchy*). Wyróżnione poziomy abstrakcji to:

- 1) cele i zamierzenia (*functional purposes* FP),
- 2) zasady (fizyczne oraz prawne, ekonomiczne itp.) umożliwiające realizację funkcji (*abstract function* AF),
- 3) opis procesu realizującego zasady (*generalised function* GF),
- 4) elementy sprzętowe (*physical function* PFn),
- 5) konfiguracja elementów sprzętowych (*physical form* PFo).

Istotną cechą ADH jest powiązanie modelu z celami oraz informacją obejmującą zmienne i relacje pomiędzy zmiennymi. Drugi wymiar dekompozycji wynika z poziomu rozróżniania składników, a zatem od spojrzenia całościowego do wyróżnienia składników podstawowych.

Elementy składowe uzyskane w modelu przenosi się na elementy graficzne interfejsu. Graficzne połączenia elementów interfejsu powinny odzwierciedlać powiązania rzeczywistych elementów składowych bądź odwzorować zależności pomiędzy poszczególnymi elementami. Przykładowo, na wskaźniku inżyniera pokładowego zobrazowano nie tylko poszczególne parametry stanu każdego z czterech zespołów napędowych, ale i procesy wymiany ciepła oraz strukturę układu paliwowego [19]. Propozycje zespołu z Delft dotyczą dodatkowych elementów obrazujących separację pionową [112] oraz symboliczną prezentację energii całkowitej i jej składników [5]. Wprowadzane elementy umożliwiają zarówno bezpośrednie wykorzystanie do sterowania (poziom umiejętności), jak i analizę stanu.

W efekcie modyfikacji metody EID została zaproponowana koncepcja oparta na paradygmacie funkcja–zachowanie–stan (*function–behavior–state*) [160]. Przyjęto następujące poziomy abstrakcji:

- funkcje,
- zasady działania, równania ograniczeń,
- zachowanie,
- stan,
- struktura.

Wymienione poziomy odpowiadają kolejnym poziomom koncepcji EID. Istotnym elementem wprowadzonym w wyniku modyfikacji jest wzięcie pod uwagę możliwości adaptacji i przełączania konfiguracji. Podstawą adaptacji interfejsu jest uwzględnienie stanów wykorzystywanych przez człowieka podczas pracy (stan normalnej pracy, detekcja uszkodzeń, diagnozowanie i kompensowanie efektów uszkodzeń). Wskazania są zmieniane zależnie od tych stanów

oraz mogą obrazować różne aspekty diagnozowanego elementu, takie jak zobrazowanie zachowania (czyli wartości aktualnych), zobrazowanie związków wynikających z zasad (czyli wartości oczekiwanych w danym stanie), zobrazowanie sterowania. Zredukowanie liczby równocześnie prezentowanych elementów interfejsu oraz możliwość wywoływania informacji adekwatnej do aktualnej czynności obsługowej mają poprawić czytelność obrazu systemu.

7.5.2. Zastosowanie metodyki EID do kształtowania interfejsu informacyjnego pilota

Wymiana informacji pomiędzy asystentem a pilotem jest istotna celem uzyskania prawidłowej świadomości sytuacyjnej z zakresu działań asystenta oraz umożliwia wspomaganie świadomości pilota co do stanu lotu samolotu. Rozwiązanie interfejsu informacyjnego wynika z analizy działań pilota i określenia informacji wykorzystywanych w procesie sterowania samolotem.

Podstawowe cele w zadaniach lotniczych to (FP):

- 1) wykonanie lotu zgodnie z planem,
- 2) utrzymanie stanu samolotu w zakresie poprawnym,
- 3) zapewnienie separacji w ruchu lotniczym,
- 4) optymalizacja działania i pracy podzespołów samolotu,
- 5) realizacja zadań misji lotniczej (w lotnictwie cywilnym najczęściej jest to przemieszczenie do lokalizacji docelowej, ale może to być także przeprowadzenie obserwacji).

Zasady (AF) dotyczące realizacji celów obejmują odpowiednio:

- 1) prawa fizyki opisujące ruch samolotu,
- 2) znane ograniczenia wynikające z wytrzymałości elementów samolotu, modele przestrzeni z uwzględnieniem powierzchni Ziemi, wysokich obiektów i techniki pilotażu,
- 3) zasady obowiązujące w ruchu lotniczym oraz modele zachowań uczestników ruchu lotniczego,
- 4) charakterystyki samolotu i jego podzespołów oraz zasady sterowania optymalnego i ekstremalnego,
- 5) znane sposoby działania podczas realizacji zadań misji.

Łącznie zasady 1., 2. i 4. określają ograniczenia osiągalnych stanów, a tym samym ograniczają zdolności manewrowe.

Na poziomie zasad (GF) należy zidentyfikować, jak przekładają się one na działania realizujące określone cele. Typowy lot składa się z kilku faz: start, wznoszenie, przelot, podejście do lądowania, lądowanie i różne manewry. Ocena stanu lotu, obejmująca także efekty interakcji z innymi użytkownikami przestrzeni powietrznej, wiąże się z zagadnieniami:

- detekcji stanu zagrożenia,
- określenia zakresu stanów bezpiecznych,
- przekazu informacji o zagrożeniu,

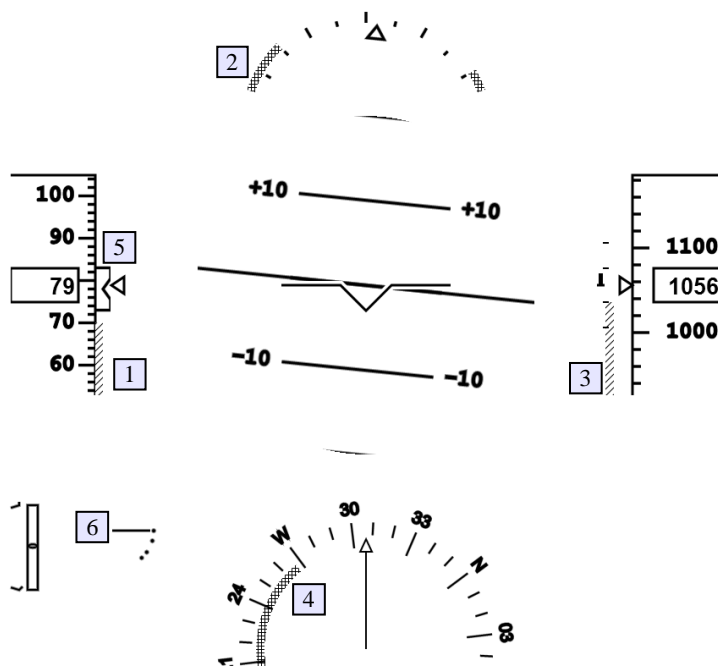
- propozycji działań,
- automatycznego wykonania działań zabezpieczających (np. manewr unik w sytuacji kolizyjnej),
- modyfikacji charakterystyk zapobiegającej osiągnięciu stanów niebezpiecznych.

Elementy realizujące funkcje (PFn) z zakresu sterowania statkiem powietrznym to elementy sterowe (np. ster wysokości, przepustnica) i odpowiednie interfejsy sterujące (odpowiednio drążek i dźwignia sterująca przepustnicą), odpowiadające sygnałom wejściowym w modelu obiektu sterowanego oraz układy i systemy pomiarowe (np. układ odniesienia, system GPS) z interfejsami informacyjnymi (odpowiednio wskaźnik pilotażowy, wskaźnik nawigacyjny). Sterowanie samolotem realizowane z wykorzystaniem systemów automatyki i systemów wspomagających wprowadza kolejne elementy sprzętowe, obejmujące układy modyfikujące charakterystyki obiektu sterowanego, układy sterujące automatycznie oraz układy wspomagające z zakresu oceny dokładności sterowania (np. wskaźniki dyrektywne, wskaźniki tunelowe).

Dodatkowe elementy zapewniające bezpieczeństwo i efektywność realizacji lotu to elementy analizujące stan i wykrywające zagrożenia, elementy realizujące proces syntezy rozwiązań w sytuacjach zagrożeń i optymalizujące pracę układów, układy automatycznie realizujące sterowanie oraz elementy przekazyujące informacje.

Ponieważ prezentacja sposobu realizacji objęła alternatywne możliwości, to przed określeniem konfiguracji systemu i formy (PFo) przekazu informacji należy sprecyzować sposób realizacji funkcji. Podstawową kwestią dotyczącą formy jest podjęcie decyzji, czy system wskazań będzie realizowany jako kontrolki czy jako wskaźniki zintegrowane. Zaprezentowane na rys. C10 (dodatek C) rozwiązania obrazują podejście polegające na wprowadzaniu kolejnych elementów, np. pulpitu ostrzeżeń (rys. 7.4), celem rozwiązania określonych problemów bądź poszerzenia funkcjonalności.

Odmienną koncepcją jest wykorzystanie wyświetlacza zintegrowanego (rys. 7.38), na którym umieszczono informacje konieczne do realizacji przelotu oraz wprowadzono elementy informacyjne realizujące funkcje przekazu informacji o zagrożeniach. Ze względu na specyfikę sposobu prezentacji na wyświetlaczu przeziernym elementy prezentujące zakresy niepoprawne zaznaczono jako wyróżnione pola na skali przyrządów (1-4 dotyczą odpowiednio: prędkości lotu, przechylenia, prędkości pionowej, kursu lub kąta drogi). Funkcja wspomaganie decyzji zrealizowana jako prezentacja pożądanej wartości i szerokości przedziału wokół tej wartości jest reprezentowana na wskaźniku prędkości lotu jako element (5). Wspomaganie może być wykorzystane do optymalizacji przelotu w stanach braku zagrożeń oraz jako wartość nakazana, pozwalająca uniknąć niebezpieczeństwa.



Rys. 7.38. Widok wskaźnika HUD z elementami interfejsu asystenta; 1-6 – objaśnienia w tekście

Dodatkowe elementy informacyjne (6) obrazują stan, w jakim znajdują się płaszczyzny sterowe, których wychylenie nie jest przekazywane pilotowi przez interfejsy sterujące (trymer oraz klapy).

Zadanie asystenta zostanie przeanalizowane szczegółowo pod kątem wspomaganie doboru parametrów przelotu. Możliwe sposoby realizacji prowadzą do trzech kryteriów, podanych jako możliwe opcje celu działań (tab. 7.1). Analiza zaprezentowana w tab. 7.1 dotyczy sterowania w ruchu symetrycznym.

Z przeprowadzonej analizy wynika, jakie wielkości powiązane z funkcjami asystenta powinny być przedstawione na wskaźniku. Rysunek 7.39 przedstawia część wskaźnika realizującego interfejs informacyjny asystenta z zakresu wspomaganie pilota realizującego określone fazy lotu, kiedy asystent na podstawie stanu lotu i analizy działań pilota określa zasadę sterowania (sterowanie optymalne, sterowanie ekstremalne), a następnie parametry lotu zapewniające spełnienie kryteriów. Prezentowane są tutaj pożądane wartości prędkości lotu (2) oraz kąt pochylenia (3). Zaprezentowane wskazania odpowiadają sytuacji analizowanej w pkt 4.3.3, kiedy przelot nad przeszkodą terenową wymaga uzyskania maksymalnie stromego wznoszenia. Wtedy zakres wartości dopuszczalnych kąta pochylenia i prędkości lotu się zawęża. Strefa 1. obrazuje to ograniczenie.

Tabela 7.1. Dekompozycja funkcji wspomaganie doboru parametrów przelotu

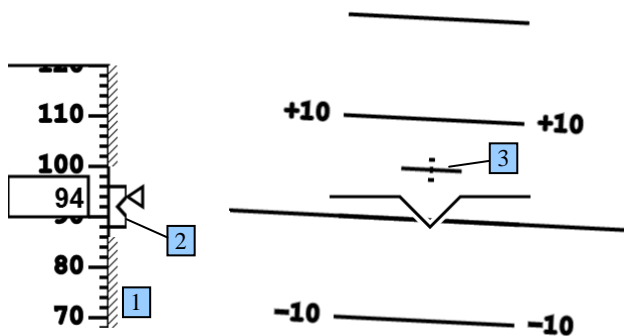
FP	lot ustalony	bezpieczeństwo lotu	1) optymalizacja przelotu (np. minimalne zużycie paliwa) 2) sterowanie ekstremalne (np. minimalny czas przelotu) 3) wykonanie przelotu w sposób zapewniający znalezienie się w punkcie docelowym w określonym czasie
AF	<ul style="list-style-type: none"> • równania równowagi sił i momentów • model zakłóceń atmosferycznych • prawa opisujące działanie zespołu napędowego 		• zasady sterowania odpowiedniego dla wersji 1., 2., 3.
GF	<ul style="list-style-type: none"> • określenie sytuacji, w jakiej znajduje się samolot i fazy lotu • określenie parametrów lotu do realizacji odpowiedniej zasady sterowania 		
PFn	<ul style="list-style-type: none"> • prezentacja stanu aktualnego • odczyt wartości zadanych przez pilota, interpretacja i realizacja 		<ul style="list-style-type: none"> • określenie wartości zadanych zgodnie z przyjętą zasadą sterowania • prezentacja stanu pożądanego
	<ul style="list-style-type: none"> • sterowanie automatyczne i informacja o aktywności systemu automatycznego • sterowanie aktywnymi organami sterowymi 		
PFo	<ul style="list-style-type: none"> • interfejsy sterujące (dźwignia sterująca zespołem napędowym) • mechanizmy wykonawcze sterów i system pośredniego sterowania (dla sygnałów sterujących: δ_H, $\delta_{I_{r_{ym}}}$, β, α_p i in.) • wskaźniki prezentujące stan samolotu (IAS, θ, H, w, GS lub TAS) • wskaźniki prezentujące zabronione zakresy wartości zmiennych stanu 		<ul style="list-style-type: none"> • wskaźniki prezentujące wartości pożądane (IAS, θ, ...) • informacja o sposobie sterowania • informacja o trybie pracy systemu: wspomaganie z zakresu zabezpieczeń, automatyczna realizacja, tryb informacyjny

Kolejna funkcja informacyjna asystenta została zaprezentowana na rys. 7.40. Jest nią predykcja położenia i kursu samolotu widoczna jako linia przerywana (1). Wartości odstępów wynikają z aktualnej prędkości lotu. Wskaźnik łączy dwie funkcje:

- obrazowanie sytuacji horyzontalnej,
- wskaźnik kursu,

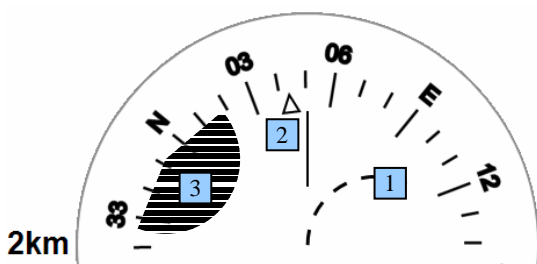
dlatego widoczne są dwie skale. Skala kątowna odpowiada stosowanym w lotnictwie rozwiązaniom. Skalowanie obszaru dobrano z uwzględnieniem charakterystyk manewrowych samolotu.

Na wskaźniku są prezentowane aktualne wartości kursu i kąta drogi (2) oraz jest zrealizowana wizualizacja stref zabronionych (wynikających z łącznej oceny położenia względem powierzchni Ziemi, wysokich obiektów i ruchu lotniczego)



Rys. 7.39. Widok części wskaźnika HUD w trybie wspomagania realizacji sterowania

– obszar (3). W odróżnieniu od wersji wskaźnika widocznej na rys. 7.38, gdzie określono jedynie zabronione wartości kąta drogi, wizualizacja strefy zabronionej obrazuje przyczynę ograniczenia, czyli korzystnie wpływa na świadomość sytuacyjną.



Rys. 7.40. Widok wskaźnika kursu z predykcją trajektorii; 1-3 – objaśnienia w tekście

Rozwinięcie prezentacji przez pewien schemat zobrazowania (gęstość wypełnienia, kolorystyka) poziomu niebezpieczeństwa lub w przypadku przeszkód terenowych (wysokości przeszkody) dodatkowo rozbudowuje obraz otoczenia. W pewnych sytuacjach może to być istotna pomoc dla pilota w podejmowaniu decyzji.

7.6. Badanie pracy asystenta z aktywnymi organami sterowymi

Realizacja zaprezentowanej ogólnie koncepcji współdziałania z wykorzystaniem aktywnych organów sterowych wymaga eksperymentalnego dostrojenia wielu parametrów. Mimo istnienia przesłanek teoretycznych wielokrotnie występują istotne braki dotyczące parametrów modeli opisujących dane zjawisko. Także złożoność strukturalna asystenta w połączeniu z nieliniowością modelu powoduje, że istnieje wiele czynników (takich parametrów asystenta, jak współczynniki wzmocnienia, charakterystyki filtrów, wartości progów detekcji), które

mają wpływ na jego reakcję. Także uzyskanie poprawnego oprogramowania nie jest zagadnieniem trywialnym dla złożonego pod względem wzajemnych zależności systemu i wymaga wielu prób sprawdzających.

Z konieczności testy muszą dotyczyć jedynie wybranych konfiguracji, a zatem pozytywne efekty współpracy z człowiekiem należy uznać za potwierdzenie potencjalnych możliwości metody. Wystąpienie negatywnych interakcji nie przesądza jeszcze o tym, że koncepcja jest błędna.

Głównym celem prezentowanego badania jest sprawdzenie wpływu układu zabezpieczeń na pilota. Tego rodzaju eksperyment wiąże się z koniecznością wprowadzenia stanu samolotu w zakres nieprawidłowy, czyli działania całkowicie sprzecznego z podstawowymi zasadami pilotażu. Przeprowadzenie takiego eksperymentu przez celowe doprowadzenie do stanu nieprawidłowego umożliwia przetestowanie działania układu zabezpieczeń. Sprawia jednak, że niemożliwe jest sprawdzenie rzeczywistej interakcji pilota i asystenta wobec sytuacji całkowicie odmiennej niż mogąca wystąpić w locie rzeczywistym. Jedynie na etapie strojenia oraz kontroli oprogramowania celowe doprowadzanie określonej zmiennej stanu lub kilku zmiennych stanu samolotu do zakresu, w którym powinien zadziałać asystent, jest poprawne metodycznie. Można wówczas przyjąć kilka scenariuszy testowych, uwzględniając zarówno sytuacje, kiedy działania asystenta są akceptowane, jak i takie, kiedy pilot przeciwstawia się jego decyzjom. W każdej z tych sytuacji możliwa jest ocena reakcji asystenta na podstawie zmian w czasie zarejestrowanych zmiennych.

Niestety, znacznie trudniejsze jest wiarygodne zweryfikowanie współpracy pomiędzy człowiekiem a asystentem. Otoczenie operacyjne powinno stwarzać wrażenie podobieństwa zadania do lotu rzeczywistego, natomiast sytuacje niepoprawne muszą być pośrednim, a nie bezpośrednim efektem planu eksperymentu. Szczególnie przydatne jest wtedy wykorzystanie modelu otoczenia odzwierciedlającego ukształtowanie terenu i zobrazowanie tego otoczenia na stanowisku badawczym.

Badany asystent pilota realizuje następujące funkcje:

- 1) modyfikacja charakterystyk samolotu,
- 2) analiza stanu samolotu pod względem nieprzekroczenia obszaru stanów dozwolonych,
- 3) analiza działań pilota,
- 4) sterowanie siłą reakcji dźwigni sterującej zespołem napędowym,
 - 4.1) sterowanie zespołem napędowym w przypadkach nadmiernego oraz niedostatecznego wysterowania
- 5) sterowanie charakterystykami dwuosiowej sterownicy,
 - 5.1) automatyczne trzymowanie,
 - 5.2) realizacja ostrzeżeń w przypadkach uznanych za niebezpieczne,
- 6) sygnalizacja rodzaju zagrożenia na pulpicie ostrzeżeń lub na wyświetlaczu wielofunkcyjnym.

W teście zbadano wpływ asystenta na wysiłek związany ze sterowaniem samolotem. W tym celu zrealizowano zadania polegające na przelocie (na stanowisku symulacyjnym) nad terenem o zmiennej wysokości zgodnie z planem lotu (tab. 7.2), w którym podano wartości odpowiednich zmiennych stanu, jakie należy utrzymywać. Plan lotu został tak przygotowany, aby pilot musiał kontrolować poprawność stanu samolotu i weryfikować możliwość utrzymania zadanych wartości parametrów lotu. Zgodnie z metodyką opisaną w pracy [214] został określony zbiór zmiennych:

$$P = \{H, w, \theta, \dot{\theta}, IAS, n; \delta_r, \delta_H\} \quad (7.10)$$

zawierający zmienne stanu i sygnały sterujące w ruchu symetrycznym. Dla tego zbioru można wyróżnić następujące czynności, w zależności od wyboru zmiennej podstawowej (pierwsza podana zmienna określa sposób działania, pozostałe są zmiennymi pomocniczymi w procesie sterowania bądź istnieje konieczność monitorowania ich wartości, średnikiem zaś oddzielono zmienne stanu od zmiennych sterujących):

- 1) $H = \text{const}, w = 0; \theta, IAS$ – utrzymanie stałej wysokości lotu,
- 2) $w = \text{const}; \theta, H, IAS$ – wznoszenie/opadanie ze stałą prędkością,
- 3) $\theta = \text{const}; w, H, IAS$ – lot z zadaniem kątem pochylenia,
- 4) $\theta(t); \dot{\theta}(t), H, w, IAS$ – manewr zmiany kąta pochylenia,
- 5) $H(s); w, \theta$ – przelot zgodnie z zadaniem profilem wysokości,
- 6) $IAS = \text{const}; \theta, w$ – lot ze stałą prędkością.

Dwie zmienne sterujące powodują, że w procesie sterowania są realizowane równocześnie dwie czynności (np. stabilizacja wysokości – 1 lub prędkości pionowej – 2 przy stałej prędkości lotu – 6).

Czynności 1-3 oraz 6 w warunkach ustalonych są mało absorbujące pilota (prędkość pionowa i kąt pochylenia są stałe lub wolno zmienne, a konieczne korekty wychylenia steru wysokości nieznaczne), dopiero wprowadzenie zakłóceń (turbulencji), konieczność zmiany wartości zadanych oraz dodatkowych czynności powodują konieczność działań pilota. Zmiana wartości zadanej powoduje wprowadzenie innych czynności – np. 4. Czynności typu 5 to przelot po trajektorii, gdy zmiana wysokości jest określona pewną funkcją przestrzenną.

Aby spowodować możliwość zadziałania zabezpieczeń w eksperymencie, przelot odbywał się z wykorzystaniem wskazań wysokości barometrycznej standardowej, a ukształtowanie terenu było zmienne. Wymuszało to wizualną kontrolę wysokości nad powierzchnią Ziemi. Plan lotu polegał na utrzymywaniu podawanych w tab. 7.2 wartości zmiennych od momentu określonego przez czas realizacji eksperymentu. Równocześnie należało zadbać o to, aby pozostałe zmienne stanu przyjmowały wartości prawidłowe. Przewidywany sposób stero-

wania powoduje, że istnieje możliwość przeoczenia kontroli zmiennych, które zostały wymienione w kolumnie „Możliwe przeoczenia”.

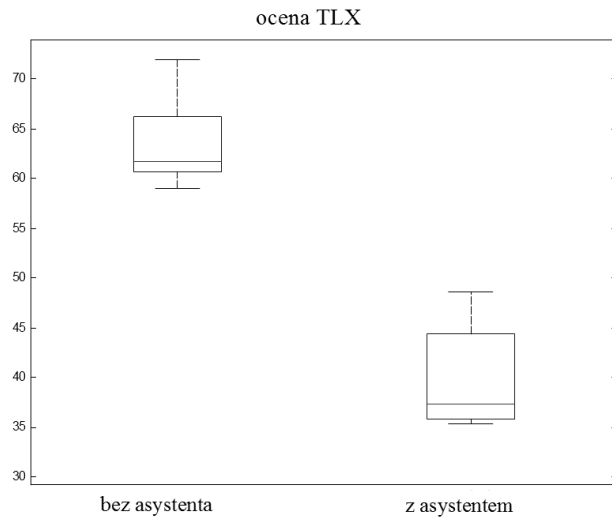
Tabela 7.2. Plan lotu podczas testu (puste pola w planie lotu są celowe)

Czas [min:sek]	Kurs	Wysokość (std)	Prędkość	Obroty	Asystent	Możliwe przeoczenia
0	160	400				
1:00		300	90			<i>H</i>
2:00				2000	+	<i>IAS</i>
2:30			100		+	<i>n, H</i>
3:00		400			+	<i>IAS</i>
4:30		300			+	<i>IAS, n, w</i>
6:00	260	600			+	<i>IAS, w</i>
7:00		500	120		+	<i>n</i>
9:00		300			-	<i>H</i>
10:00	180				-	
11:00			90		-	<i>H, w</i>
15:00	90	600	90		-	<i>IAS</i>
17:00	0	300	120		-	<i>n, H</i>
20:00		400		2000	+	<i>IAS</i>
Swobodny przelot ze zmianami wysokości z załączonym i wyłączonym asystentem.						

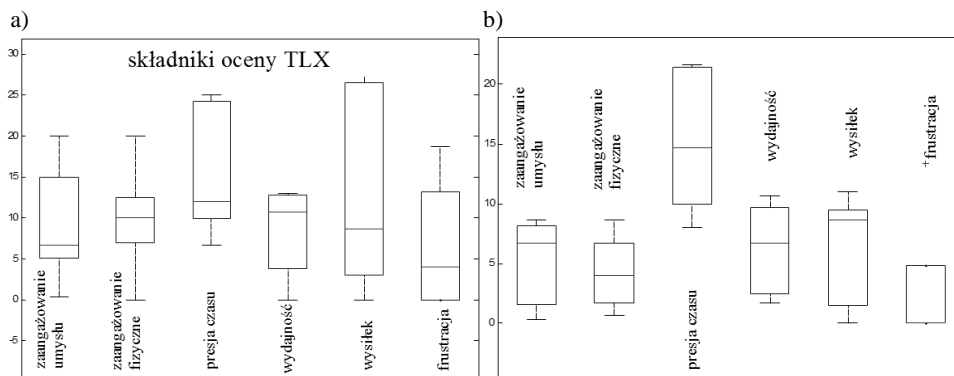
Przed testem każdy uczestnik miał możliwość wykonania lotu zapoznawczego, aby się oswoić z charakterystykami modelowanego samolotu oraz obsługą stanowiska. Po zakończeniu właściwego lotu testowego dokonywano oceny poziomu obciążenia metodą TLX. Do wypełnienia ankiety wykorzystywanej w metodzie TLX został użyty zmodyfikowany program, który ocenia dwa etapy: gdy eksperyment odbywał się bez oddziaływania asystenta na aktywne organa sterowe i gdy asystent był aktywny.

Efekty analizy zostały przedstawione na rys. 7.41. Widoczne jest znaczne zredukowanie wysiłku wymaganego do sterowania po zastosowaniu asystenta. Wartości obciążenia dla poszczególnych składników (rys. 7.42) pokazują, że przy mniejszym poziomie zaangażowania i wysiłku rośnie wydajność. Prawie całkowite wyeliminowanie frustracji oznacza, że działania asystenta są znaczną pomocą w sytuacjach, w których człowiek nie jest pewien swoich umiejętności czy decyzji. Jedynie wartość średnia składnika presji czasu jest zwiększona (choć bez asystenta wartości maksymalne są większe), co może sugerować, że wobec obniżenia poziomu ogólnego obciążenia uczestnicy testów mieli moż-

liwość dokładniejszego wykonywania planu lotu i rzeczywiście średnia waga dla presji czasu była nieco większa przy załączonym asystencie.



Rys. 7.41. Wartości obciążenia zadaniem określone metodą TLX



Rys. 7.42. Składniki obciążenia zadaniem określone metodą TLX bez asystenta (a), z asystentem (b); składniki w kolejności: wymagane zaangażowanie umysłowe, wymagane zaangażowanie fizyczne, presja czasu, ocena osiągniętej wydajności, wysiłek, poziom frustracji

Znaczna redukcja poziomu obciążenia zadaniowego stanowi łączny efekt działania agentów składowych. Dzięki wspomaganie świadomości sytuacyjnej przez ocenę stanu, prezentację oceny przez aktywne organa sterowe i wprowadzenie dodatkowych informacji zmniejszył się wysiłek i sterowanie samolotem stało się łatwiejsze.

8. PODSUMOWANIE

Wykonany przegląd zagadnień teoretycznych dotyczących współpracy człowieka z systemami sterowania ilustruje wzrost złożoności interakcji towarzyszący rozwojowi systemów technicznych. Efektywne wykorzystanie systemów sterowania oraz urządzeń służących do przekazywania informacji pomiędzy człowiekiem a systemem sterowanym jest uwarunkowane prawidłowym uwzględnieniem właściwości człowieka.

Propozycja potraktowania systemu technicznego (obejmującego obiekt sterowany, interfejsy i podsystemy sterowania automatycznego) jako narzędzia, którym posługuje się człowiek oraz wprowadzenie modelu efektywnego systemu wprowadza nowe kryteria projektowe oraz otwiera nowe możliwości z zakresu rozwiązań technicznych kształtujących współpracę człowieka z systemem. Zaprezentowane przykłady rozwiązań i wyniki badań pokazują metody dostosowania charakterystyk systemu do właściwości człowieka przez formowanie przekazu oraz automatyzację. Opracowana zasada kompatybilności informacyjnej interfejsów oraz wskaźnik wartości informacji określają, jak ukształtować sygnały sterujące oraz sygnały prezentowane w procesie sterowania. Adaptacyjna automatyzacja procesu sterowania, redukując złożoność modelu efektywnego, ułatwia korzystanie przez człowieka z systemów sterowania pracujących w wielu trybach. Opracowana metoda sterowania ze zmianą trybów, uwzględniająca charakterystyki obiektu, jakim jest samolot i zawierająca mechanizm zmiany trybów dostosowany do intencji człowieka, jest praktyczną realizacją idei adaptacyjnej automatyzacji.

Poza ułatwianiem korzystania z systemów zautomatyzowanych możliwość oceny stanu i ostrzeżenie oraz zabezpieczenie przed osiągnięciem stanów niepoprawnych są ważnymi funkcjami wprowadzanymi w systemach automatyki wspomagającej człowieka. Wprowadzenie elementów uniemożliwiających doprowadzenie do stanu niebezpiecznego wpisuje się w modyfikacje modelu efektywnego, jednak nie jest w pełni zgodne ze specyfiką sterowania załogowym aparatem latającym – stąd propozycja asystenta pilota.

Asystent pilota poza kształtowaniem charakterystyk obiektu uczestniczy w procesie decyzyjnym i może realizować sterowanie. Te funkcje czynią z asystenta dodatkowego członka załogi. Nowy sposób funkcjonowania wymaga innego niż typowe sposobu projektowania oraz wprowadzenia elementów umożliwiających dialog z pilotem. W pracy zaproponowano trzy rozwiązania umożliwiające łącznie realizację asystenta:

- realizacja w strukturze systemu wieloagentowego,
- aktywne organa sterowe,
- kształtowanie interfejsów zgodnie z koncepcją środowiskową (EID).

Ogólna struktura asystenta, czyli system wieloagentowy, uwzględnia całość zagadnienia wspomaganie pilota, tworząc szkielet, w którym umieszczone są kolejne elementy realizujące wyróżnione funkcje cząstkowe. Przy kształtowaniu interfejsu informacyjnego asystenta uwzględniono konieczność prawidłowego kształtowania świadomości sytuacyjnej pilota. Przekaz informacji odbywa się dwoma kanałami. Prezentacja graficzna stanu z wprowadzonymi dodatkowymi elementami prezentującymi ograniczenia w sytuacji reakcji asystenta na zagrożenie uzupełnia informację przekazywaną przez siłę reakcji aktywnych organów sterowych. Uzyskane wyniki badań, w szczególności dotyczące ostrzegania przez aktywne organa sterowe, potwierdzają poprawność opracowanej koncepcji.

Zagadnienie testowania urządzeń współdziałających z człowiekiem stawia szczególne wymagania z zakresu metodyki badań. W odróżnieniu od badania jakości działania systemów sterowania, których ocena wynika z analizy błędów, konieczne jest uwzględnienie czynników wynikających z interakcji. Wskaźniki opisujące efekty występujące podczas sterowania przez człowieka to: poziom obciążenia realizacją zadania, świadomość sytuacyjna, a także subiektywne oceny i odczucia związane z realizacją zadania za pomocą różnych środków. Czynniki wpływające na wymienione wskaźniki zależą jednak nie tylko od charakterystyk badanych rozwiązań, ale w znacznym stopniu również od właściwości konkretnej osoby i jej aktualnego stanu psychofizycznego. Z tego powodu efektywność poszczególnych rozwiązań badano metodami porównawczymi, w których zmiana wyniku po wprowadzeniu określonego rozwiązania określa wpływ rozwiązania na proces sterowania przez człowieka.

Ogólny wniosek wynikający z niniejszej pracy jest następujący: **powinno być zasadą, że część techniczną zespołu składającego się z człowieka i systemu sterowania należy dostosowywać do właściwości człowieka.**

Mimo zdolności adaptacyjnych człowieka, które często maskują niedostatki urządzeń i systemów, obecny stan wiedzy z zakresu efektów współpracy i sposobów projektowania umożliwia przewidywanie i badanie w warunkach laboratoryjnych skutków wprowadzania określonych rozwiązań oraz celowe kształtowanie charakterystyk. Zaprezentowane metody powinny ułatwić analizę i realizację systemów sterowania współdziałających z człowiekiem.

Działanie systemu sterowania jako asystenta, który współdziała w procesie sterowania z człowiekiem, eliminuje negatywne efekty występujące w wyniku wprowadzenia automatyzacji bez uwzględnienia całościowego wpływu na sposób funkcjonowania człowieka.

DODATKI

A. Ocena współpracy człowieka z systemem sterowania

Pomiary efektów współpracy człowieka z systemem sterowania są istotne podczas eksperymentalnej weryfikacji opracowanych koncepcji teoretycznych, nowych rozwiązań oraz modyfikacji wprowadzanych do istniejących systemów. System z człowiekiem to połączenie dwóch elementów o odmiennych właściwościach. Metody pomiarowe wykorzystujące skale pomiarowe, dla których istnieją ściśle określone, powtarzalne wzorce, to metody wykorzystywane w technice. Jakość realizacji zadania podczas współpracy człowieka z systemem technicznym daje się zapisać w postaci ścisłych wskaźników, takich jak: maksymalny błąd, wariancja sygnału błędu, czas realizacji, czas reakcji, liczba błędów.

Wpływ systemu technicznego na człowieka określają natomiast takie wielkości, jak [205]:

- adekwatność świadomości sytuacyjnej,
- poziom obciążenia,

dla których nie istnieją jednoznaczne wzorce miar, stąd wykorzystanie odmiennych niż w technice metod pomiarowych. Świadomość sytuacyjna dotyczy wewnętrznego obrazu stanu procesu podczas sterowania. Brak bezpośredniego dostępu do tego obrazu jest przyczyną trudności w pomiarach świadomości sytuacyjnej (pkt 3.3.1).

Poza wymienionymi składnikami współpracę człowieka z systemem charakteryzuje subiektywny odbiór właściwości systemu, który znajduje odzwierciedlenie w poziomie akceptacji i w poziomie zaufania [205]. Poziom obciążenia podczas realizacji zadania jest tym wskaźnikiem, który niesie najwięcej informacji o współdziałaniu człowieka z systemem. Odpowiednie zaprojektowanie testu umożliwia wykorzystanie poziomu obciążenia do oceny innych czynników, np. świadomości sytuacyjnej.

Metody pomiarowe stosowane podczas określania poziomu obciążenia obejmują [26, 45, 55, 61, 69, 80, 95, 101, 180]:

- pomiary fizjologiczne – polegające na pomiarze parametrów, na które ma wpływ poziom obciążenia (tętno, ciśnienie krwi, objętość oddechowa, wilgotność skóry, średnica źrenicy, aktywność elektryczna mózgu, a w szczególności charakterystyka impulsu P300, aktywność ruchowa odpowiednich dla realizowanego testu mięśni, poziom tlenu we krwi),

- pomiar pośredni z wykorzystaniem wskaźników jakości – polegający na wykorzystaniu zależności jakości realizacji zadania od poziomu obciążenia przez
 - sterowanie poziomem obciążenia jednego zadania,
 - wprowadzenie zadania dodatkowego i utrzymywanie go na stałym poziomie jakości (paradygmat zadania podstawowego) lub utrzymywanie zadania podstawowego na stałym poziomie jakości (paradygmat wolnych zasobów), kiedy drugie zadanie określa poziom obciążenia,
- badanie ankietowe polegające na klasyfikacji ogólnego poziomu obciążenia przez osobę badaną (zmodyfikowana skala Coopera–Harpera, skala Bedford),
- subiektywne skale oceny poziomu obciążenia – SWAT, NASA TLX.

Podczas badania efektów wprowadzenia nowych rozwiązań szczególnie użyteczne są metody porównawcze, w których wynikiem oceny jest klasyfikacja porządkowa badanych opcji pod względem określonego czynnika. Metoda porównawcza oceny rozwiązania technicznego polega na przeprowadzeniu testu składającego się z kilku zadań identycznych pod względem sposobu realizacji, w których są stosowane różne rozwiązania elementu badanego. Po zakończeniu testu osoba wykonująca zadania dokonuje porównania poszczególnych rozwiązań w założonych kategoriach. Aby uniknąć konieczności przyporządkowania wartości liczbowych, co wymaga od testującego utworzenia umysłowego modelu skali i może być dodatkowym czynnikiem zwiększającym niepewność wyniku, możliwe jest porównanie parami. Wyniki testu sprowadzają się więc do posortowania poszczególnych rozwiązań. Wraz ze wzrostem liczby porównywanych rozwiązań n_r można uzyskać wyższą rozdzielczość pomiaru, jednak właściwości człowieka powodują, że przy zbyt dużej liczbie rozwiązań mogą się pojawić pomyłki. Dodatkowo należy pamiętać, że liczba porównań p jest liczbą kombinacji dwuelementowych ze zbioru n_r :

$$p = \binom{n_r}{2} = \frac{n_r!}{2!(n_r - 2)!} \quad (\text{A1})$$

a przy dużej liczbie porównań ryzyko niepoprawnej odpowiedzi wynika ze znużenia związanego z wypełnianiem formularzy.

Pomiary polegające na porównywaniu pozwalają na określenie, które z rozwiązań przewyższa pozostałe ze względu na rozpatrywany czynnik (a całościowo zbiór czynników). Taki sposób oceny modyfikacji względem stanu początkowego jest najczęściej wystarczający. Możliwe jest jednak także uzyskanie bardziej obiektywnego pomiaru, jeśli w zbiorze rozwiązań porównywanych znajdują się takie, których właściwości są znane i traktowane jako punkty stałe skali pomiarowej.

Pewnym problemem w pomiarach jest zmiana właściwości osób testujących w efekcie zwiększonego doświadczenia w realizacji zadania, co może wpływać na oceny. Zmniejszenie wspomnianego efektu następuje wówczas, gdy przed właściwym testem jest przewidziany etap zapoznawczy, podczas którego powinno nastąpić ustalenie się poziomu umiejętności realizacji zadania. Wykonując wielokrotne testy o różnej kolejności rozwiązań, z udziałem różnych osób, należy się spodziewać dodatkowej redukcji wpływu czynnika kolejności realizacji.

Metoda porównawcza może być także wykorzystana w połączeniu z innymi metodami. Przykładowo, niech przedmiotem badania będą dwa rozwiązania: A i B , i każde z rozwiązań będzie testowane przez n osób. Uzyskane wyniki (zapisane w postaci liczbowej) dla k -tej osoby są oznaczone w_{Ak} , w_{Bk} . Wykorzystując fakt, że w badaniu istotna jest różnica pomiędzy rozwiązaniami dla każdej osoby, określa się wskaźnik:

$$\Delta = f(w_A, w_B) \quad (A2)$$

Funkcja f spełnia warunki:

$$\left. \begin{array}{l} \forall x > y, f(x, y) > 0 \\ \forall x = y, f(x, y) = 0 \\ \forall x < y, f(x, y) < 0 \end{array} \right\} \quad (A3)$$

Interpretacja wartości Δ wynika z postaci tej funkcji i charakterystyki skali pomiarowej wskaźnika w . Po zastosowaniu metody analizy wariancji ANOVA [146, 164, 329, 330] można stwierdzić, czy zastosowane rozwiązanie wpływa na sposób działania ludzi. Wprowadzenie wskaźnika (wzór (A2)) pozwala na prawidłową ocenę rozwiązań także wtedy, gdy predyspozycje osób testujących znacznie od siebie odbiegają, w odróżnieniu od porównania zbiorów wyników $\{w_{Ak}\}$ i $\{w_{Bk}\}$.

B. NASA-TLX

NASA-TLX (*task load index* – wskaźnik obciążenia zadaniowego) jest metodą subiektywnej oceny obciążenia zadaniowego, którą opracowano na podstawie analizy czynników wpływających na poziom obciążenia [26, 105, 106, 316, 318, 331]. Stwierdzono, że wyniki testów tą metodą cechuje wysoka powtarzalność oraz odtwarzalność. Procedura testowa nie zaburza testu ani nie wpływa na sam jego przebieg. Metoda NASA-TLX jest szeroko stosowana do oceny poziomu obciążenia człowieka podczas zadań łączących różne formy aktywności [21, 27, 105, 151, 152].

Ocenianymi czynnikami są:

- wymagane zaangażowanie umysłu (*mental demand*),
- wymagane zaangażowanie fizyczne (*physical demand*),
- presja czasu (*temporal demand*),
- jakość realizacji, osiągnięta wydajność (*performance*),
- wysiłek, wyczerpanie (*effort*),
- poziom frustracji (*frustration level*).

Procedura pomiaru składa się z dwóch etapów wykonywanych w formie ankiety po zakończeniu realizacji zadania. W pierwszym określa się wagi poszczególnych składników obciążenia na podstawie oceny ich istotności dla realizowanego zadania. Określenie wartości wag odbywa się przez porównanie parami wszystkich kombinacji czynników. Waga czynnika wynika z ilorazu liczby wyborów do liczby wystąpień na liście. Na rysunku B1 przedstawiono okno programu widoczne podczas ustalania wag.

Ocena obciążenia zadaniowego metodą NASA-TLX

Wybierz z każdej pary czynnik istotniejszy dla poziomu obciążenia

Wprowadź

Pomoc

Z. fizyczne Wydajność

Presja czasu Wysiłek

Z. fizyczne Frustracja

Wysiłek Wydajność

Frustracja Z. umysłu

Z. umysłu Z. fizyczne

Wydajność Presja czasu

Wysiłek Z. umysłu

Z. fizyczne Presja czasu

Z. umysłu Wydajność

Presja czasu Z. umysłu

Wydajność Frustracja

Z. fizyczne Wysiłek

Frustracja Wysiłek

Presja czasu Frustracja

Ocena testu

Rys. B1. Okno oprogramowania TLX podczas określania wag czynników

W drugim etapie dokonuje się właściwej oceny poziomu dla każdego czynnika w przedziale od 0 do 100 (przyjęto rozdzielczość 5). Okno programu dla tego etapu pokazano na rys. B2. Wynik testu jest określony z zależności:

$$M = \sum_{i=1}^n w_i \cdot m_i \quad (\text{B1})$$

gdzie: w_i – waga określona dla i -tego czynnika,
 m_i – wartość wybrana w drugim etapie. Wynik jest liczbą z przedziału od 0 (brak obciążenia) do 100 (maksymalne obciążenie).

Rys. B2. Okno oprogramowania TLX podczas określania poziomów obciążenia

C. Stanowisko symulacyjne

Symulacja jest narzędziem umożliwiającym realizację testów zbliżonych do warunków pracy w sytuacjach rzeczywistych oraz zapewniającym bezpieczną realizację testów stanów, które w warunkach sterowania systemami rzeczywistymi skutkują katastrofą.

Zastosowania symulatorów obejmują:

- trening operatorów,
- badanie człowieka,

- badanie właściwości rozwiązań technicznych, syntezę i testowanie rozwiązań
 - działania systemów technicznych,
 - współdziałania systemów technicznych z człowiekiem,
- odtwarzanie przebiegu zdarzeń.

Osobną grupą są symulatory modelujące człowieka, wykorzystywane do oceny zaangażowania zasobów i poziomu obciążenia [93, 292, 304].

Ogólna koncepcja stanowiska symulacyjnego wynika z analizy wymagań w odniesieniu do zadania testowania systemów sterujących i rozwiązań cząstkowych w tych systemach przeznaczonych do współpracy z człowiekiem. Podstawową cechą stanowiska symulacyjnego powinna być zdolność takiego konfigurowania, aby możliwe było przeprowadzenie eksperymentów cząstkowych układów i całościowych systemu oraz przy różnych konfiguracjach i parametrach badanych elementów (interfejsów informacyjnych i sterujących oraz sterowników systemu sterowania). Trenażery lotnicze nie spełniają tego założenia ze względu na ściśle zdefiniowane przeznaczenie oraz ograniczone możliwości ingerencji w ich strukturę.

Realizowane na stanowisku symulacyjnym funkcje obejmują:

- modelowanie ruchu samolotu z możliwością realizacji różnych konfiguracji,
- przetwarzanie informacji prezentowanej dla pilota,
- system wskazań modelujący przyrządy kokpitu z możliwością realizacji różnych konfiguracji,
- modelowanie obrazu otoczenia,
- mechanizmy programistyczne i sprzętowe umożliwiające wprowadzanie układów i algorytmów sterujących zarówno na poziomie symulacji, jak i przez dołączenie rzeczywistych urządzeń,
- podłączenie różnego rodzaju interfejsów sterujących,
- rejestrację zmiennych stanu eksperymentu w zestawie zależnym od rodzaju eksperymentu,
- obserwację przebiegu eksperymentu.

Zaprezentowany sposób realizacji stanowiska symulacyjnego opisuje rozwiązanie opracowane w ramach projektu [221] i łączy w sobie także koncepcje rozwijane w ramach prac nad systemami sterowania samolotów bezzałogowych [40, 220].

W odróżnieniu od symulatora badawczego wykorzystywanego w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych [89, 274, 275], przeznaczonego do badania interfejsów informacyjnych w długotrwałych lotach, stanowisko badawcze było projektowane tak, aby umożliwić badanie różnych elementów (różne formy wskazań, formowanie sygnałów, układy sterowania automatycznego i wspomagające pilota). Ograniczone odwzorowanie otoczenia obniża realizm wykonywanego zadania, co jednak nie powinno istotnie wpływać na wyniki badań prowadzonych metodami porównawczymi.

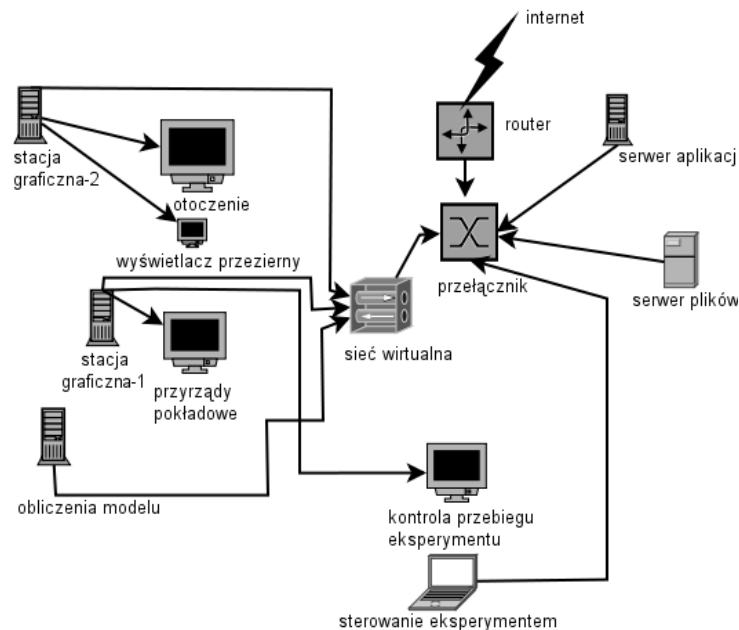
Przyjęto, że magistralą systemu awioniki jest linia CAN [323], a protokołem komunikacyjnym CANaerospace [269]. Rozwiązanie oparte na pokładowej magistrali CAN jest stosowane w pracach Katedry Awioniki i Sterowania od wielu lat [219]. Przyjęta struktura symulatora umożliwia zarówno testowanie samych algorytmów, urządzeń prototypowych, jak i gotowych urządzeń awioniki samolotu. Stanowisko zostało wykonane jako symulator pracujący w czasie rzeczywistym w zakresie części modelującej procesy dynamiczne (xPC Target [333]), a część odpowiedzialna za prezentację jest zrealizowana bez tego wymagania, przy założeniu odpowiedniej dla niezakłóconej prezentacji mocy obliczeniowej [41].

Stanowisko symulacyjne zostało wykonane z wykorzystaniem dwóch rodzajów magistral:

- magistrali łączącej sterowniki i inne urządzenia pokładowe – CAN,
- magistrali łączącej elementy symulacyjne i elementy obrazujące – Ethernet.

Druga z magistral może w przyszłości stanowić bazę do wprowadzenia interfejsu AFDX [322], co umożliwi bezpośrednie badanie elementów współczesnej i przyszłościowej awioniki dla lotnictwa komunikacyjnego.

Aplikacje czasu rzeczywistego (modelowanie ruchu i prezentacja) na stanowisku komunikują się ze sobą przez protokół UDP, z wykorzystaniem technologii QoS i sieci wirtualnej (rys. C1), natomiast aplikacje pomocnicze (komputer sterujący eksperymentem, komputer rejestrujący, serwery) znajdują się poza tą



Rys. C1. Struktura sieci stanowiska symulacyjnego

siecią. Magistrala lokalna wykorzystująca jako medium transmisyjne Ethernet w wersji 1000Base-T zapewnia dużą przepustowość, co umożliwia przesyłanie dużego strumienia danych niezbędnego dla uzyskania przepływu właściwie niezakłóconego opóźnieniami. Takie rozwiązanie umożliwia przekazywanie wszystkich zmiennych stanu niezbędnych do określenia efektów eksperymentów do aplikacji służących monitorowaniu eksperymentów i rejestracji przebiegów wartości zmiennych stanu oraz do sterowania całego stanowiska. Każdy z pakietów danych posiada identyfikator, na wzór stosowanego w magistralach lotniczych, zwiększany w ramach pojemności jednego bajtu (od 0 do 255). Zapewnia on skuteczny przekaz informacji o kolejności ramek i ich wzajemnym odstępie czasowym.

Magistrala CAN (charakteryzująca się mniejszą przepustowością od Ethernetu) łączy symulowane układy pomiarowe, układy sterujące, sterowniki dźwigni mocy oraz sterownicy, emulując funkcjonowanie rzeczywistej magistrali pokładowej dla samolotu ogólnego przeznaczenia. Ze względu na pełną kompatybilność z magistralą pokładową stanowisko umożliwia testowanie urządzeń przed ich instalacją na pokładzie samolotu.

Dzięki zastosowaniu tej koncepcji można prowadzić testy z wykorzystaniem wykonanego stanowiska po zamianie symulowanego układu sterującego przez układ komputera pokładowego oraz podłączenie innych elementów kokpitu (może to być np. wykonany dla systemu sterowania samolotem pulpit kontrolny). Podłączenie rzeczywistego komputera sterownika, przy dobrze wykonanych próbach algorytmów na etapie symulacyjnym, powinno być jedynie elementem prób dowodowych, potwierdzających poprawność funkcjonowania systemu. Należy jednak pamiętać, że nie zawsze te same algorytmy wykonywane na różnych platformach sprzętowych oraz realizowane z innym oprogramowaniem systemowym będą działać identycznie. Dodatkowo, efekty opóźnień wynikających z połączenia układów przez magistralę systemu sterownia mogą umknąć uwadze przy symulacjach, gdy takie ograniczenie nie występuje.

Modelowanie ruchu samolotu

Model ruchu samolotu składa się z części ogólnej, niezależnej od rodzaju samolotu (przy założeniu określonej klasy samolotów) oraz części zawierającej parametry i charakterystyki konkretnego typu czy egzemplarza samolotu. Ogólna struktura modelu została zaprojektowana w taki sposób, aby możliwa była zmiana symulowanego samolotu. Wykorzystano tutaj fakt, że modele samolotów różnią się parametrami i charakterystykami. Postać równań jest podobna (pewne różnice mogą się wiązać z napędem, czyli typem i liczbą zespołów napędowych, lecz wiele elementów da się opisać w sposób uniwersalny, np. samolot ze śmigłem stałym można w modelu uznać za szczególny przypadek samolotu ze śmigłem przestawialnym, a samolot ze stałym podwoziem za szczególny przypadek samolotu z podwoziem chowanym). Charakterystyki samolotów są

zapisane w postaci struktury danych i zawierają tabele charakterystyk aerodynamicznych uzależnionych od warunków (np. liczba Macha, wysokość lotu). Charakterystyki są tworzone według metodyki Datcom [82, 332], z wprowadzonymi poprawkami wynikającymi z istnienia niemodelowanych przez ten program efektów. Charakterystyki zespołu napędowego są także wprowadzane w formie tabeli współczynników ciągu, momentu i charakterystyk silnika. Zbiór danych opisujących obecną konfigurację jest przekazywany do modelu przed uruchomieniem procesu symulacji. W trakcie symulacji możliwa jest zmiana parametrów, np. masy i położenia środka masy samolotu.

Ogólna struktura modelu przedstawiona na rys. C2 zawiera:

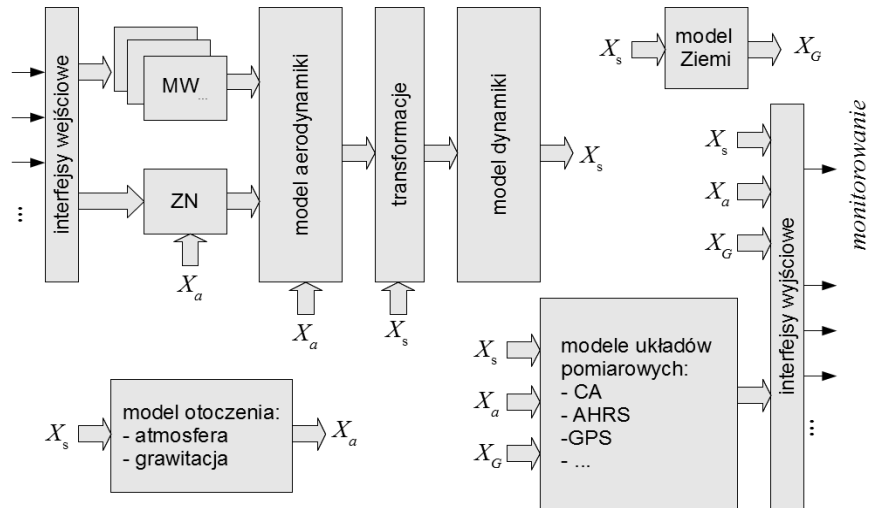
- model aerodynamiki – opisujący charakterystyki płatowca,
- transformacje – elementy obliczeniowe wykorzystywane do przeliczania pomiędzy różnymi układami współrzędnych,
- model dynamiki – element obliczeniowy, w którym rozwiązywane są równania ruchu,
- MW – bloki modelujące charakterystyki mechanizmów wykonawczych lub charakterystyki statyczne przeniesienia przemieszczeń organów sterowych na powierzchnie sterowe,
- ZN – model zespołu napędowego,
- model otoczenia – zawierający modele atmosfery standardowej, model grawitacji oraz modelujący ruchy powietrza w atmosferze (wiatr, turbulencja),
- model Ziemi – wybrane odwzorowanie geodezyjne,
- modele układów pomiarowych – elementy odwzorowujące charakterystyki statyczne i dynamiczne układów pomiarowych,
- interfejsy wejściowe i wyjściowe – elementy zapewniające komunikację z innymi elementami stanowiska, w tym z komputerem rejestrującym przebieg eksperymentu.

Zaznaczone zostały następujące grupy zmiennych stanu:

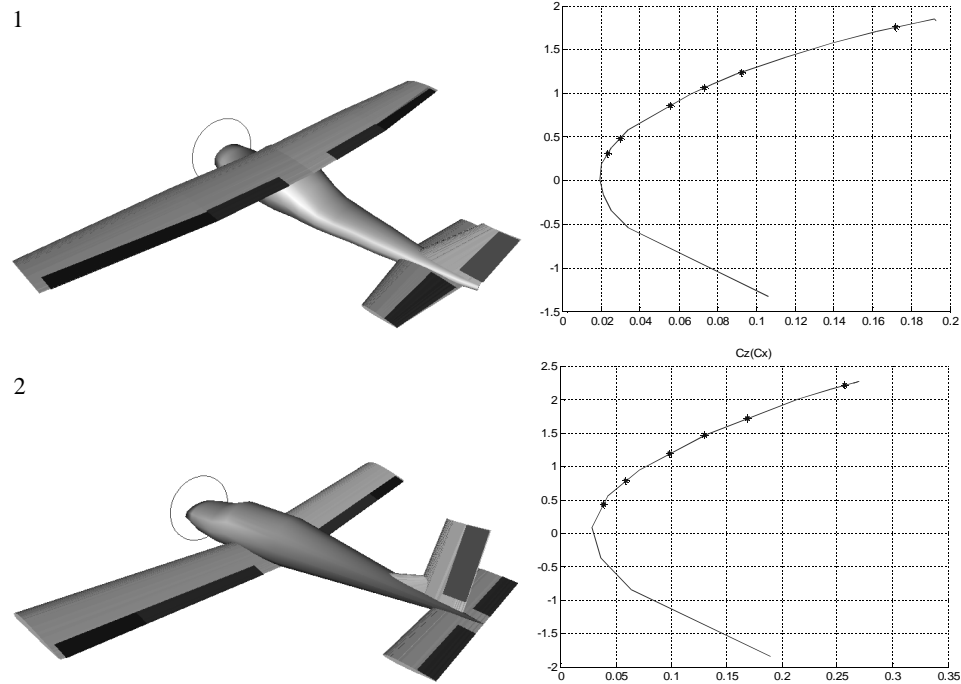
- X_s – opisujące stan ruchu samolotu w układzie związanym z samolotem F_B ,
- X_G – opisujące ruch samolotu w układzie ziemskim F_E ,
- X_a – zawierające wielkości związane z oddziaływaniem atmosfery i grawitacji.

Na rysunku C3 przedstawiono widok brył dwóch samolotów, których modele wykorzystano na stanowisku. Na podstawie pełnych modeli zostały wyliczone:

- wartości sterowania w stanie ustalonego lotu,
- wartości współczynników w modelach postaci uproszczonej wykorzystywanej do opracowania praw sterowania,
- postaci modów samolotu, czyli częstotliwości i tłumienia oscylacji krótkookresowych i fugoid oraz modów ruchu bocznego.



Rys. C2. Struktura modelu symulacyjnego samolotu

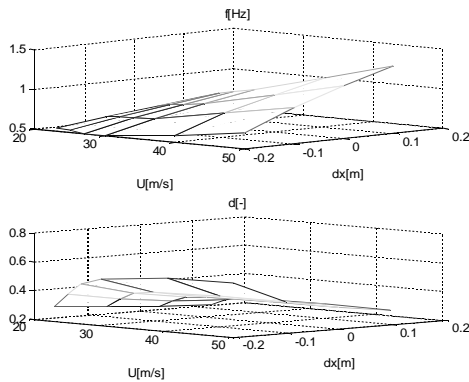
Rys. C3. Widok geometrii samolotów (zaznaczono powierzchnie sterowe oraz biegunowe $C_z(C_x)$) z zaznaczonymi punktami stanów ustalonych, dla których określono parametry oscylacji krótko- i długookresowych i fugoid

Samolot 1. (dwumiejscowy, o masie startowej 570-700 kg)

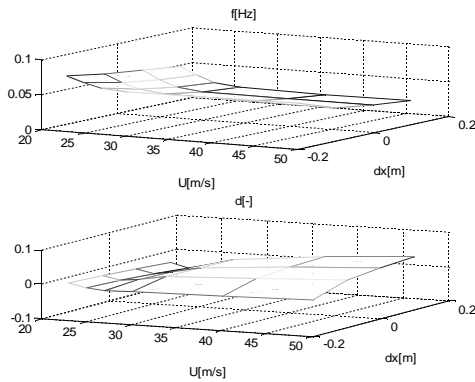
Parametry modów w ruchu symetrycznym: oscylacje krótkookresowe 0,5-0,7 Hz dla małych prędkości lotu rosną, osiągając 0,8-1,3 Hz przy 50 m/s, tłumienie dla małych prędkości słabe (0,2-0,3), dla większych zależne od wyważenia (od 0,3 do 0,6), fugoidy przy małych prędkościach rozbieżne (ok. $-0,01$), przy wyższych słabo tłumione (do 0,04) lub nietłumione, zależnie od wyważenia; przy małych prędkościach lotu częstotliwości od 0,06-0,08 Hz (wartości zależne od wyważenia), ze wzrostem prędkości częstotliwości spadają (do 0,03-0,06 w zależności od wyważenia).

W ruchu niesymetrycznym: słabo tłumione holendrowanie (częstotliwości od 0,32 do 0,52 Hz), tłumienie spadające z prędkością lotu; rozbieżna spirala; ruch przechylający o stałej czasowej od 0,07 dla dużych prędkości, do 0,2 dla małych.

Na rysunkach C4 i C5 przedstawiono wyniki obrazujące zmiany charakterystyk (częstotliwości f i tłumienia d oscylacji krótkookresowych oraz długo-okresowych), zależnie od stanu lotu opisanego przez położenie środka masy oraz prędkość lotu. Stany ustalone zaznaczono na biegunowej $Cz(Cx)$ (rys. C3 – odpowiednio 1. i 2.).



Rys. C4. Parametry oscylacji krótkookresowych (samolot 1.)



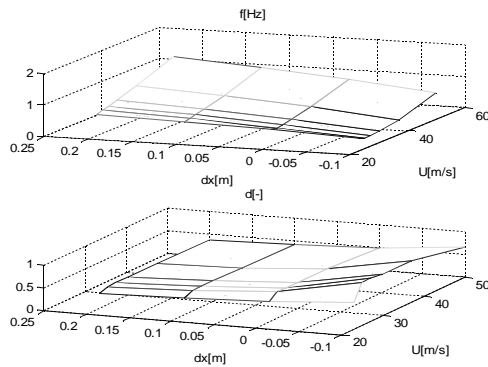
Rys. C5. Parametry fugoid (samolot 1.)

Samolot 2. (czteromiejscowy, o masie startowej 650-850 kg)

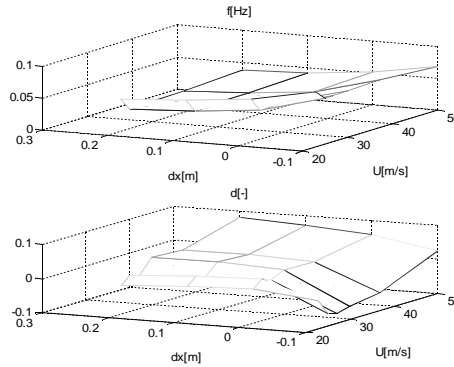
Parametry modów w ruchu symetrycznym: oscylacje krótkookresowe 0,4-0,7 Hz dla małych prędkości lotu, rosnące z prędkością 0,8-1,5 Hz, silnie zależne od wyważenia, tłumienie silnie zależne od wyważenia, fugoidy słabo tłumione bądź rozbieżne, zależnie od wyważenia; przy małych prędkościach o częstotliwości 0,05-0,09 Hz nieznacznie maleją z prędkością, przy wzroście prędkości tłumienie się poprawia.

W ruchu niesymetrycznym: słabo tłumione holendrowanie (częstotliwości od 0,28 do 0,56 Hz), tłumienie rośnie z prędkością lotu, stabilna spirala, przechylenie o stałej czasowej od 0,04 dla dużych prędkości do 0,10 dla małych.

Na rysunkach C6 i C7 przedstawiono wyniki obrazujące zmiany charakterystyk (częstotliwości f i tłumienia d oscylacji krótkookresowych oraz długo-okresowych), zależnie od stanu lotu opisanego przez położenie środka masy oraz prędkość lotu. Zaznaczone na biegunowych $C_z(C_x)$ (rys. 9.5) punkty pokazują zakres zmienności stanów ustalonych.



Rys. C6. Parametry oscylacji krótkookresowych (samolot 2.)



Rys. C7. Parametry fugoid (samolot 2.)

Aplikacje składowe systemu

Aplikacje systemu modelowania realizują w warunkach symulacyjnych odwzorowanie stanowiska pracy pilota, zapewniają obsługę elementów sprzętowych (poza aktywnymi organami sterowymi) dołączanych do symulatora oraz służą do sterowania eksperymentem i rejestracji wyników. Stanowisko symulacyjne zawiera następujące aplikacje:

- 1) model symulacyjny zrealizowany jako aplikacja pod kontrolą systemu czasu rzeczywistego,
- 2) aplikacje obsługujące elementy sprzętowe,
- 3) aplikacje kokpitu,
- 4) aplikacja panelu kontrolnego zespołu napędowego,
- 5) aplikacja modelu i wizualizacji otoczenia,
- 6) aplikacja wskaźnika przeziernego,
- 7) aplikacje rejestrujące i kontrolne,
- 8) aplikacje obsługujące interfejsy sterujące.

Ad 1. Model symulacyjny, poza modelem ruchu samolotu, zawiera modele mechanizmów wykonawczych, układów pomiarowych oraz sterowników.

Ad 2. Aplikacje dostarczają informacji o aktualnych wartościach nastawianych oraz stan elementów przestawnych (nastawniki obrotowe bądź przesuwne,

przełączniki, klawisze). Komunikacja odbywa się przez łącze Ethernet, przez komunikaty rozgłoszeniowe o założonej strukturze.

Ad 3. Aplikacje kokpitu obrazują stan samolotu w postaci wskaźników. W zależności od potrzeb może to być zestaw wskaźników klasycznych bądź wskaźniki wielofunkcyjne lub wskaźniki zależne od rodzaju eksperymentu. Informacje, jakie mają być wyświetlane, są dostarczane przez Ethernet z komputera modelującego.

Ad 4. Aplikacja panelu zespołu napędowego służy do prezentacji w formie zbliżonej do spotykanej w istniejących systemach informacji o stanie pracy zespołu napędowego. Niezbędne informacje są przesyłane przez model zespołu napędowego i model układów pomiarowych związanych z tym zespołem (składnik modelu symulacyjnego) przez łącze Ethernet.

Ad 5. Aplikacja służąca do prezentacji otoczenia samolotu urealnia otoczenie realizowanego eksperymentu. W uproszczonej wersji może obrazować położenie linii horyzontu oraz istnienie dodatkowych elementów związanych z prowadzonym eksperymentem, takich jak obraz lotniska (przy modelowaniu podejścia do lądowania oraz startu) oraz obraz przeszkód (przy modelowaniu reakcji na zagrożenie). W wersji zaawansowanej powinna to być aplikacja z realistycznym modelem ukształtowania i zobrazowania otoczenia.

Ad 6. Wskaźniki przeziernie znacząco zmieniają współdziałanie człowieka z układami technicznymi. Wprowadzenie tego rodzaju wskazań umożliwia oczywiście badanie sposobów kształtowania informacji na samym wskaźniku. W niektórych badaniach wykorzystanie wskaźnika przeziernego obniża całkowity poziom trudności zadania, co pozwala na uzyskanie większej czułości pomiaru badanych czynników, niezwiązanych bezpośrednio z prezentacją informacji. Wskaźnik przezierny może być wykonany w wersji realistycznej bądź jako emulacja przez wykorzystanie aplikacji nakładającej wskazania na obraz otoczenia.

Ad 7. Ponieważ wszystkie informacje przesyłane w sieci lokalnej mogą być dostępne także dla innych komputerów dołączonych do sieci stanowiska symulacyjnego, dodatkowe aplikacje umożliwiają zarówno zapis tych informacji, jak i prezentację w formie wygodnej dla eksperymentatora (np. wykresy).

Ad 8. Interfejsy sterujące są włączone w strukturę stanowiska na dwa sposoby:

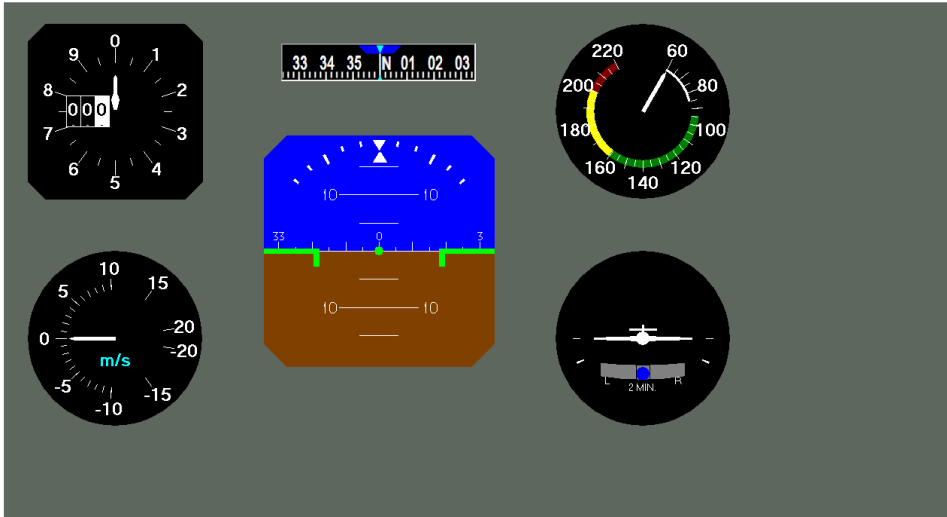
- przez odpowiednie aplikacje komputerowe obsługujące panele zawierające nastawniki, przełączniki itd., ale także organa sterowe (orczyk, sterownice, dźwignie sterujące) przekazujące informacje za pośrednictwem sieci Ethernet,
- jako urządzenia dołączone do systemu sterowania przez magistralę systemu sterowania (w prezentowanej realizacji jest to magistrala CAN). Dotyczy to badania właściwości urządzeń przeznaczonych do pracy na pokładzie samolotu bądź ich prototypów funkcjonalnych (czyli urządzeń wykonanych w taki sposób, aby realizować założone funkcje bez

uwzględnienia wymagań, jakie musiałyby zostać spełnione celem instalacji na pokładzie samolotu).

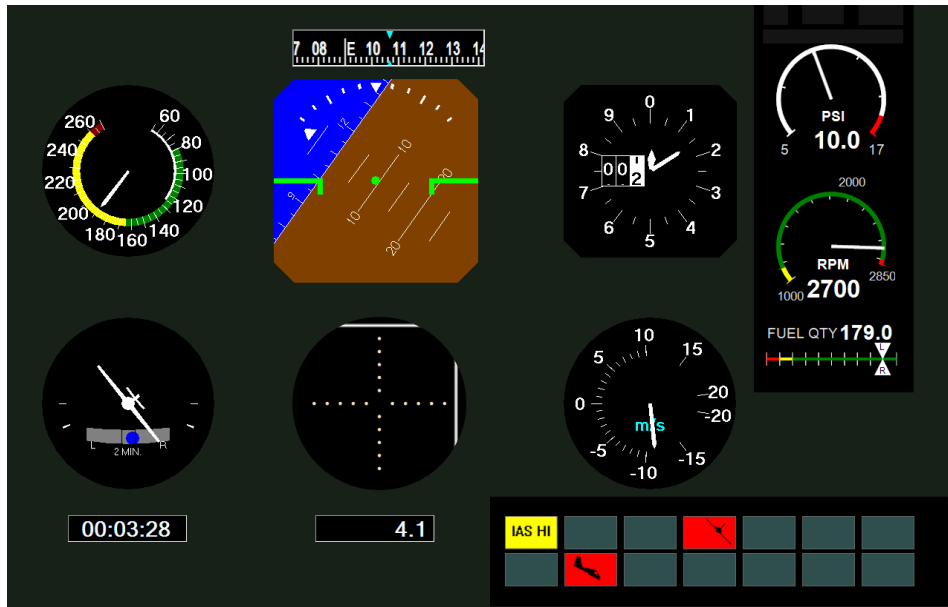
Poszczególne elementy stanowiska zostały zaprezentowane na kolejnych rysunkach. Ogólny widok od strony pilota przedstawiono na rys. C8. W górnej części jest widoczny realistyczny obraz otoczenia, natomiast w dolnej – zobrażenie elementów kokpitu. Ekran aplikacji KOKPIT zaprezentowano w dwóch wersjach (na rys. C9 i C10), celem zobrazowania możliwości zmiany zbioru i układu wskaźników. Zestaw wskaźników składa się z wysokościomierza i wariometru, kompasu i sztucznego horyzontu ze wskaźnikiem kursu, prędkościomierza i zakrętomierza oraz dodanych na rys. C10: wskaźnika nakazowego, wskaźnika odległości (DME) i czasomierza.



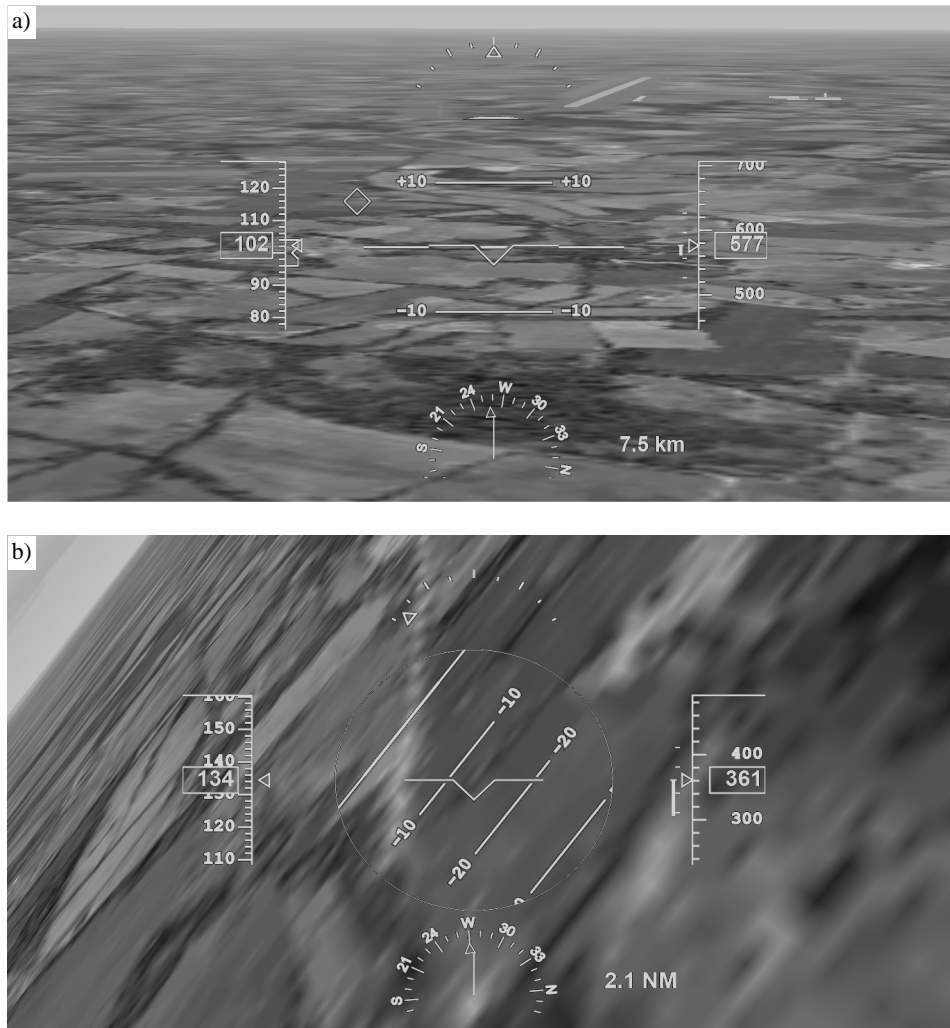
Rys. C8. Stanowisko symulacyjne – widok z realistycznym zobrażeniem otoczenia (fot. P. Ciecicki)



Rys. C9. Widok ekranu aplikacji KOKPIT – stan: brak danych z symulatora



Rys. C10. Widok ekranu kokpitu z panelem kontrolnym zespołu napędowego oraz panelem ostrzeżeń



Rys. C11. Widok aplikacji HUD na tle obrazu otoczenia samolotu: a) w locie prostoliniowym z widocznym wskaźnikiem ILS, b) w zakręcie z widocznym ostrzeżeniem o przechyleniu

Możliwość swobodnego kształtowania zestawu interfejsów jest istotna podczas realizacji badań z zakresu współpracy człowieka z systemem technicznym. Poza zmianami konfiguracji aplikacji KOKPIT zastosowano mechanizmy pozwalające na budowanie tablicy przyrządów z kilku aplikacji. Na rysunku C10 widoczne są także dwie dodatkowe aplikacje:

- panel kontrolny zespołu napędowego (zobrazowanie stanu zespołu napędowego),
- pulpit ostrzeżeń (element, który został wprowadzony w eksperymentach).



Rys. C12. Stanowisko obrazujące elementy sprzętowe – eksperymentalne urządzenia (aktywna sterownica dwuosioowa – pkt 6.2.2, aktywna dźwignia sterująca zespołem napędowym – pkt 6.2.3, pulpit sterujący i monitor aplikacji KOKPIT) (fot. P. Ciecński)

Innym sposobem prezentacji przewidzianym na stanowisku jest wyświetlacz przezierny (HUD). Możliwe są dwie realizacje:

- realistyczna,
- symulowana.

Podczas realistycznej prezentacji obraz z projektora HUD jest prezentowany przez układ optyczny na tle obrazu otoczenia, co skutkuje koniecznością akomodacji wzroku przy naprzemiennej obserwacji otoczenia i przyrządów jak w samolocie.

Drugie rozwiązanie nie wymaga dodatkowych elementów sprzętowych. Polega na nałożeniu obrazu aplikacji HUD na obraz otoczenia. Rysunek C11

przedstawia dwa obrazy otoczenia, ze wskazaniem nałożonymi na ten obraz metodą programową dla różnych stanów lotu oraz różnych konfiguracji. Na rysunku C11a widoczny jest wskaźnik ścieżki podejścia do lądowania, a na rys. C12 – stanowisko z eksperymentalnymi aktywnymi organami sterowymi. Jest to jedna z konfiguracji elementów sprzętowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ahn K., Development of Force Reflecting Joystick for Hydraulic Excavator, *JSME Int. J.*, 47(3), 2004, pp. 858-863
- [2] Al-Aidroos N., Guo R.M., Pratt J., You can't stop new motion: Attentional capture despite a control set for colour, *Visual Cognition*, 18(6), 2010, pp. 859-880
- [3] Alechina N., Logan B., Nguyen H.N., Rakib A., Automated Verification of Resource Requirements in Multi-Agent Systems Using Abstraction, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6572, 2011, pp. 69-84
- [4] Alexander A.L., Wickens C.D., Mervin D.H., Perspective and Coplanar Cockpit Displays of Traffic Information: Implications for Maneuver Choice, Flight Safety, and Mental Workload, *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 15, no 1, 2005, pp. 1-21
- [5] Amelink M.H.J., Mulder M., van Paassen M.M., Flach J., Theoretical Foundations for a Total Energy-Based Perspective Flight-Path Display, *International Journal of Aviation Psychology*, 15(3), 2005, pp. 205-231
- [6] Anderson B., Moore J., *Filtracja optymalna*, WNT, Warszawa 1984
- [7] Antal C., Granichin O., Levi S., Adaptive Autonomous Soaring of Multiple UAVs Using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, 49th IEEE Conference on Decision and Control, 15-17 December 2010
- [8] Artman, H., Garbis, C., Situation Awareness as Distributed Cognition, [in:] T. Green, L. Bannon, C. Warren, Buckley (eds.), *Cognition and cooperation. Proceedings of 9th Conference of Cognitive Ergonomics*, Limerick, Ireland 1998, pp. 151-156
- [9] Åstrom K., Hägglund T., *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, ISA Press, NC, 1995
- [10] Åstrom K.J., Wittenmark B., *Adaptive Control*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [11] Atoyan H., Shahbazian E., Analyses of the Concept of Trust in Information Fusion and Situation Assessment, *Harbour Protection Through Data Fusion Technologies, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 2009, pp. 161-170
- [12] Augustin T., The problem of meaningfulness: Weber's law, Guilford's power law, and the near-miss-to-Weber's law, *Mathematical Social Sciences*, vol. 57, 2009, pp. 117-130
- [13] Bagassi S., De Crescenzo F., Persiani F., Design and evaluation of a four-dimensional interface for air traffic control, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 224, 2010, pp. 937-947

- [14] Balaji P.G., Srinivasan D., An Introduction to Multi-Agent Systems, [in:] Innovations in Multi-Agent Systems and Applications, Studies in Computational Intelligence, vol. 310, 2010, pp. 1-27
- [15] Baxter J.W., Horn G.S., Controlling Teams of Uninhabited Air Vehicles, AAMAS'05, Utrecht, Netherlands, 25-29 July 2005
- [16] Baxter J., Horn G.S., Leivers D.P., Fly-by-Agent: Controlling a Pool of UAVs via a Multi-Agent System, Applications and Innovations in Intelligent Systems XV, vol. 6, 2008, pp. 219-230
- [17] Bay J., Samad T., Multiagent Sensing and Control: Surveillance and Reconnaissance for Urban Operations, 17th Int. Symposium on Mathematical Theory of Network Systems, Kyoto, Japan, 24-28 July 2006
- [18] Beerens G.C., Damveld H.J., Mulder M., van Paassen M.M., van der Vaart J.C., Investigation into Crossover Regression in Compensatory Manual Tracking Tasks, Journal of Guidance, Control, And Dynamics, 32(5), 2009, pp. 1429-1445
- [19] Beevis D., Vicente K., Dinadis N., An Exploratory Application of Ecological Interface Design to Aircraft Systems, RTO HFM Symposium on „Collaborative Crew Performance in Complex Operational Systems”, Edinburgh, 20-22 April 1998
- [20] Besnard D., Greathead D., Baxter G., When mental models go wrong: co-occurrences in dynamic, critical systems, Int. J. Human-Computer Studies, vol. 60, 2004, pp. 117-128
- [21] Biernacki M., Bicka-Capała M., Tarnowski A., Teoretyczne i metodologiczne problemy badania obciążenia na przykładzie metody subiektywnego obciążenia pracą, Polski Przegląd Medycyny Lotniczej, 4(13), 2007, pp. 475-479
- [22] Billings C.E., Human-Centered Aviation Automation: Principles and Guidelines, NASA Technical Memorandum 110381, 1996
- [23] Bociek S., Gruszecki J., Układy sterowania automatycznego samolotem, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999
- [24] Bodner W.A., Automatyka silników lotniczych, Wydawn. Ministerstwa Obrony Narodowej, 1958
- [25] Boer E.B., Kenyon R.V., Adaptation asymetry in manual tracking, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Systems Man and Cybernetics, Orlando, Florida 1997
- [26] Boff K.R. et.al., Handbook of perception and human performance, Wiley, 1986
- [27] Boschloo H.W., Lam T.M., Mulder M., Van Paassen M.M., Collision avoidance for a remotely-operated helicopter using haptic feedback. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, The Netherlands, 10-13 October 2004, pp. 229-235
- [28] Bosser T., Adaptation to time-varying signals and control-theory models of tracking-behaviour, Psychological Research, vol. 46, 1984, pp. 155-167
- [29] Bottaro A., Yasutake Y., Nomura T., Casadio M., Morasso P., Bounded stability of the quiet standing posture: An intermittent control model, Human Movement Science, vol. 27, 2008, pp. 473-495
- [30] Breton R., Rousseau R., Situation Awareness: A Review of the Concept and its Measurement, Technical Report, DRDC Valcartier TR-2001-220, Canada 2003

- [31] Brickman B.J., Hettinger L.J., Roe M.M., Lu L., Repperger D.W., Haas M.W., Haptic Specification of Environmental Events: Implications for the Design of Adaptive, Virtual Interfaces, Proceedings of the 1996, Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS '96), pp. 147-153
- [32] Burdea G.C., Force and Touch Feedback for Virtual Reality, Wiley 1996
- [33] Burns C.M., Skraaning Jr. G., Jamieson G.A., Lau N., Kwok J., Welch R., Andresen G., Evaluation of Ecological Interface Design for Nuclear Process Control: Situation Awareness Effects, Human Factors, 50(4), 2008, pp. 663-679
- [34] Cai H., Lin Y., Tuning Trust Using Cognitive Cues For Better Human-Machine Collaboration, Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society 54th Annual Meeting, 2010, pp. 2437-2441
- [35] Carter J.F., Stoliker P.C., Flying Quality Analysis of a JAS 39 Gripen Ministick Controller in an F/A-18 Aircraft, NASA/TM-2000-209024
- [36] Carver N., Lesser V., Domain Monotonicity and the Performance of Local Solutions Strategies for CDPS-based Distributed Sensor Interpretation and Distributed Diagnosis, Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, vol. 6, 2003, pp. 35-76
- [37] Choinski D., Senik M., Multi-Agent Oriented Integration in Distributed Control System, Lecture Notes in Computer Science, vol. 6682, 2011, pp. 231-240
- [38] Cholewiak S.A., Tan H.Z., Ebert D.S., Haptic Identification of Stiffness and Force Magnitude, Environments and Teleoperator Systems, 13-14 March, Reno, Nevada, USA, 2008, pp. 87-91
- [39] Chudý P., Pieniżek J., Rzucidło P., Flight Control System for Environmentally Friendly Light Aircraft, Polish Journal of Environmental Studies, vol. 18, no. 4B, 2009
- [40] Ciecinski P., Pieniżek J., Development Stand for Unmanned Aerial Vehicles Control Systems, in Koruba Z. (ed.), Scientific Aspects of Unmanned Mobile Vehicle, Kielce University of Technology, Kielce 2010, pp. 219-232
- [41] Ciecinski P., Pieniżek J., Stanowisko symulacyjne do prowadzenia w czasie rzeczywistym testów układów sterowania samolotem, [w:] Trybus L., Samolej S. (ed.), Projektowanie, analiza i implementacja systemów czasu rzeczywistego, WKiŁ, Warszawa 2011, s. 447-458
- [42] Ciecinski P., Pieniżek J., Rzucidło P., Tomczyk A., Modyfikacja charakterystyk systemu pośredniego sterowania samolotem z wykorzystaniem interfejsów człowiek-maszyna, Journal of Aeronautics Integra, t. 2, z. 4, 2008, s. 29-36
- [43] Clarke D.W., Mohtadi C., Tuffs P.S., Generalized Predictive Control, Automatica, 23(2), 1987, pp. 137-160
- [44] Codognot P., A Simple Language for Describing Autonomous Agent Behaviours, The Seventh International Conference on Autonomic and Autonomous Systems, Venice/Mestre, Italy 2011, pp. 105-110
- [45] Colle H.A., Reid G.B., Context Effects in Subjective Mental Workload Ratings, Human Factors, 40(4), 1998, pp. 591-600
- [46] Collinson R.P.G., Introduction to Avionics Systems, Springer, 2011

- [47] Cooke N.J., Pringle H.L., Pedersen H.K., Connor O. (ed.), *Human Factors of Remotely Operated Vehicles*, *Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research*, vol. 7, Elsevier, 2006
- [48] Crocquesel C., Legras F., Coppin G., *Trust Evaluation through Human-Machine Dialogue Modelling*, *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6781, 2011, pp. 504-513
- [49] Czarnik M., *Sterowanie samolotem bezzałogowym ze stacji kontroli lotu*, praca dyplomowa (promotor J. Pieniążek), WBMiL Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2010
- [50] Czyba R., Błachuta M.J., *Dynamic Contraction Method Approach to Robust Longitudinal Flight Control under Aircraft Parameters Variations*, *AIAA Paper* 43172, 2003
- [51] da Silva R.R., Romero R.A.F., *Modelling Shared Attention Through Relational Reinforcement Learning*, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 66(1-2), 2012, pp. 167-182
- [52] D'Azzo J.J., Houpis C.H., *Linear Control System Analysis and Design*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York 1988
- [53] Dasgupta P., *Distributed Automatic Target Recognition Using Multiagent UAV Swarms*, *AAMAS'06*, Hakodate, Hokkaido, Japan, 8-12 May 2006
- [54] Dasgupta P., O'Hara S., Petrov P., *A Multi-agent UAV Swarm for Automatic Target Recognition*, *Defence Applications of Multi-Agent Systems*, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3890, 2006, pp. 80-91
- [55] de Greef T., Lafeber H., van Oostendorp H., Lindenberg J., *Eye Movement as Indicators of Mental Workload to Trigger Adaptive Automation*, [in:] D.D. Schmorrow (eds.) et.al.: *Augmented Cognition*, *HCII 2009*, *LNAI 5638*, 2009, pp. 219-228
- [56] de Hauwere Y.M., Vranx P., Nowé A., *Multi-Agent Systems and Large State Spaces*, *Agent and Multi-agent Technology for Internet and Enterprise Systems Studies in Computational Intelligence*, vol. 289, 2010, pp. 181-205
- [57] de Stigter S., Mulder M., van Passen M.M., *Design and Evaluation of a Haptic Flight Director*, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 30(1), 2007, pp. 35-46
- [58] Degani A., Shafto M., Kirlik A., *Modes in Human-Machine Systems: Reviews, Classification, and Application*, *Int. J. of Aviation Psychology*, vol. 9, no 2, pp. 125-138
- [59] Dehaene S., *The neural basis of the Weber–Fechner law: a logarithmic mental number line*, *TRENDS in Cognitive Sciences*, 7(4), 2003, pp. 145-147
- [60] Devasia S., Chen B., Paden B., *Inversion Based Regulation of Non-linear Systems*, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 41(7), 1996, pp. 930-942
- [61] Dhillon B.S., *Human reliability in engineering systems*, in *Design Reliability: Fundamentals and Applications*, CRC Press, 1999
- [62] Di Nuovo A.G., Cannavò R.B., Di Nuovo S., *An Intelligent Infrastructure for In-Flight Situation Awareness of Aviation Pilots*, [in:] D.D. Schmorrow, C.M. Fidopiastis (eds.): *FAC 2011*, *HCII 2011*, *LNAI 6780*, 2011, pp. 598-607

- [63] Dismukes R.K., Remembrance of Things Future: Prospective Memory in Laboratory, Workplace, and Everyday Settings, *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, vol. 6, 2010, pp. 79-119
- [64] Diston D.J., *Computational Modelling and Simulation of Aircraft and the Environment*, vol. 1, Wiley 2009
- [65] Dixon S.R., Wickens C.D., McCarley J.S., How do Automation False Alarms and Misses Affect Operator Compliance and Reliance?, *Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society, 50th Annual Meeting, 2006*, pp. 25-29
- [66] Doherty P., Heintz F., Landén D., A Delegation-Based Architecture for Collaborative Robotics, *Agent-Oriented Software Engineering XI: 11th International Workshop, AOSE 2010, Toronto, Canada, May 10-11, 2010*, pp. 205-247
- [67] Dovier A., Formisano A., Pontelli E., Autonomous Agents Coordination: Action Description Languages meet CLP (\mathcal{FD}) and Linda, *25th Italian Conference on Computational Logic, Rende, Italy, 7-9 July 2010*
- [68] Ellis K., Erdos R., Craig G., Gubbels A., Investigation of Human Operator Performance in Response to Active Force Cueing, *American Helicopter Society, 58th Annual Forum, Montreal, Quebec, 11-13 June 2002*
- [69] Embrey D., Blackett C., Marsden P., Peachey J., Development of a Human Cognitive Workload Assessment Tool, *MCA Report, Human Reliability Associates, 2006*
- [70] Endsley M.R., Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT), *Aerospace and Electronics Conference NAECON, 23-27.05.1988*, vol. 3, Dayton, USA, pp. 789-795
- [71] Endsley M., Toward a theory of situation awareness in dynamic systems, *Human Factors*, 37(1), 1995, pp. 32-64
- [72] Endsley M., Garland D., *Situation Awareness Analysis and Measurement*, CRC Press 2008
- [73] Endsley M.R., Kaber D.B., Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task, *Ergonomics*, vol. 42, 1999, pp. 462-492
- [74] Endsley M.R., Kiris E.O., The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation, *Human Factors*, 37(2), 1995, pp. 381-394
- [75] Endsley M.R., Bolte B., Jones D.G., *Designing for situation awareness, An Approach to User-Centered Design*, Taylor and Francis, 2003
- [76] Falkena W., Borst C., Chu Q.P., Mulder J.A., Investigation of Practical Flight Envelope Protection Systems for Small Aircraft, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 34(4), 2011, pp. 976-988
- [77] Famularo D., Martino D., Mattei M., Constrained Control Strategies to Improve Safety and Comfort on Aircraft, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 31(6), 2008, pp. 1782-1792
- [78] Fan X., McNeese M., Sun B., Human-Agent Collaboration for Time-Stressed Multicontext Decision Making, *IEEE Trans. on SMC, part A*, 40(2), 2010

- [79] Faulkner S., Kolp M., Wautelet Y., Achbany Y., A Formal Description Language for Multi-Agent Architectures, *Lecture Notes in Computer Science, Agent-Oriented Information Systems IV*, vol. 4898, 2008, pp. 143-163
- [80] Fazel-Rezai R., *Recent Advances in Brain-Computer Interface Systems*, InTech, 2011
- [81] Few D., Bruemmer D., *Seamless Autonomy: Removing Autonomy Level Stratifications*, Conference on Human System Interaction HSI'08, Kraków 2008
- [82] Fink R., USAF Stability and Control DATCOM, AFWAL-TR-83-3048, 1978
- [83] Foulkes A.J. McC., Miall R.Ch., Adaptation to visual feedback delays in a human manual tracking task, *Experimental Brain Resarches*, vol. 131, 2000, pp. 101-110
- [84] Frey B.F., Thomas M.J.W., Walton A.J., Wheeler P.J., WOMBAT as an example of situational awareness testing in pilot selection: An argument for the alignment of selection, training and performance, *Proc. of the 11th International Symposium on Aviation Psychology*, Columbus, OH: Department of Aviation, The Ohio State University, 2001
- [85] Funk K., Kim J.N., Agent-Based Aids Facilitate Cockpit Task Management, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, Piscataway, USA 1995
- [86] Gawthrop P.J., Wang L., Constrained intermittent model predictive control, *International Journal of Control*, 82(6), 2009, pp. 1138-1147
- [87] Gawthrop P., Loram I., Lakie M., Gollee H., Intermittent control: a computational theory of human control, *Biological Cybernetics*, vol. 104, 2011, pp. 31-51
- [88] Gibson J.C., Hess R.A., *Stick and Feel System Design*, AGARD-AG-332, 1995
- [89] Gołębiowski W., Lorocho L., Możliwości poprawy świadomości sytuacyjnej pilota poprzez kształtowanie interfejsu człowiek-maszyna w kokpitach wojskowych statków powietrznych, *Journal of KONBiN*, 4(7), 2008, s. 55-70
- [90] Gonzalez C., Wimisberg J., Situation Awareness in Dynamic Decision Making: Effects of Practice and Working Memory, *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(1), 2007, pp. 56-74
- [91] Goodrich M., Quigley M., Learning Haptic Feedback for Guiding Driver Behavior, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, pp. 2507-2512
- [92] Goraj Z., *Dynamika i aerodynamika samolotów manewrowych z elementami obliczeń*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2001
- [93] Gore B.F., Corker K.M., System Interaction in Free Flight: A Modeling Tool Cross-Comparison, *SAE Technical Paper* 1999-01-1897
- [94] Goupil P., AIRBUS state of the art and practices on FDI and FTC in flight control system, *Control Engineering Practice*, vol. 19, 2011, pp. 524-539
- [95] Graimann B., Pfurtscheller G., Allison B. (ed.), *Brain-Computer Interfaces, Revolutionizing Human-Computer Interaction*, Springer, 2010
- [96] Griffiths P., Gillespie R.B., Shared Control Between Human and Machine: Haptic Display of Automation During Manual Control of Vehicle Heading, *Proc. of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'04)*, 2004

- [97] Gross J., Timmermann L., Kujala J., Dirks M., Schmitz F., Salmelin R, Schnitzler A., The neural basis of intermittent motor control in humans, *PNAS*, vol. 99, no 4, pp. 2299-2302
- [98] Gruszecki J., Pieniżek J.: An unmanned aircraft control on the trajectory, *The International Journal of Computers, Systems and Signals*, vol. 3, no 2, 2002, pp. 76-83
- [99] Gruszecki J., Rzucidło P., Simplified Informatics Model of Pilot-Operator and Prediction of Human Performance, *AIAA-2008-7110*, 2008
- [100] Gruszecki J., Zajdel Z., Uproszczony model predyspozycji pilota, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, z. 71, 2007, s. 13-30
- [101] Guhe M., Liao W., Zhu Z., Ji Q., Gray W.D., Schoelles M.J., Non-Intrusive Measurement of Workload in Real-Time, *Proc. of the 49th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*
- [102] Guzzella L., Onder C., *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion, Engine Systems*, Springer 2010
- [103] Hanke D., Herbst C., Active sidestick technology – a means for improving situational awareness, *Aerospace Science and Technology*, vol. 3, 1999, pp. 525-532
- [104] Harris D., A human-centred design agenda for the development of single crew operated commercial aircraft, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 79(5), 2007, pp. 518-526
- [105] Hart S.G., NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later, *Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society, 50th Annual Meeting*, 2006, pp. 904-908
- [106] Hart S.G., Staveland L.E., Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, [in:] Hancock P.A., Meshkati N. (eds.), *Human Mental Workload*, North Holland Press, Amsterdam 1988
- [107] Healy A.F., Proctor R.W, Weiner I.B., *Handbook of Psychology*, vol. 4, *Experimental psychology*, Wiley 2003
- [108] Hellendoorn H., Driankov D., Reinfrank M., *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer, Berlin 1993
- [109] Hendy K.C., Situation Awareness and Workload: Birds of a Feather?, *AGARD AMP Symposium on 'Situational Awareness: Limitations and Enhancements in the Aviation Environment*, Brussels, 24-28.04.1995
- [110] Hess R.A., An Inquiry Into Whether a Pilot-Induced Oscillation Was a Factor in the Crash of American Airlines Flight 587, *raport National Transportation Safety Board, Office of Aviation Safety*, Washington, D.C. 20594, 23 December 2003
- [111] Hess R.A., Model for Human Use of Motion Cues in Vehicular Control, *JGCD*, vol. 13, no 3, 1990, pp. 476-482
- [112] Heylen F.M., van Dam S.B.J., Mulder M., van Paassen M.M., Design and Evaluation of a Vertical Separation Assistance Display, *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 18-21 August 2008, Honolulu, Hawaii, *AIAA 2008-6969*
- [113] Ho D., Burns C.M., Ecological Interface Design in Aviation Domains: Work Domain Analysis of Automated Collision Detection and Avoidance, *Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society, 47th Annual Meeting* 2003, pp. 119-123

- [114] Ho-Hyun S., Sang-Hyun L., Youdan K., Eung-Tae K., Ki-Jung S., Design of a Flight Envelope Protection System Using a Dynamic Trim Algorithm, *International Journal of Aeronautical & Space Science*, 12(3), 2011, pp. 241-251
- [115] Hollnagel E., *Human Reliability Analysis: Context and Control*, Academic Press, 1993
- [116] Horling B., Lesser V., Vincent R., Wagner T., The Soft Real-Time Agent Control Architecture, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 12, 2006, pp. 35-91
- [117] Horowitz I., *Quantitative Feedback Design Theory – QFT*, QFT Publications, 1993
- [118] Hosman R.J.A.W., Benard B., Fourquet H., Active and passive side stick controllers in manual aircraft control, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference*, 4-7 November 1990, pp. 527-529
- [119] Howe M.L., The Adaptive Nature of Memory and Its Illusions, *Current Directions in Psychological Science*, 20(5), pp. 312-315
- [120] Imamizu H., Kawato M., Brain mechanisms for predictive control by switching internal models: implications for higher cognitive functions, *Psychological Research*, vol. 73, 2009, pp. 527-544
- [121] Inagaki T., Automation and the cost of authority, *International J. of Industrial Ergonomics*, vol. 31, 2003, pp. 169-174
- [122] Insperger T., Act-and-Wait Concept for Continuous-Time Control Systems with Feedback Delay, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(5), 2006
- [123] Insperger T., Stepan G., Act-and-Wait Control Concept for Discrete-Time Systems with Feedback Delay, *IET Control Theory & Applications*, 1(3), 2007, pp. 553-557
- [124] Isidori A., *Nonlinear Control Systems – an Introduction (2nd ed.)*, Springer Verlag, New York 1989
- [125] Itoh E., Suzuki S., Nonlinear approach for human internal models: feedforward and feedback roles in pilot maneuver, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3(10-12), 2005, pp. 2455-2462
- [126] Jagacinski R.J., Flasch J.M., *Control Theory for Humans, Quantitative Approaches to Modelling Performance*, CRC Press, Taylor&Francis, 2009
- [127] Jamieson G.A., Vicente K.J., Designing Effective Human-Automation-Plant Interfaces: A Control-Theoretic Perspective, *Human Factors*, 47(1), 2005, pp. 12-34
- [128] Jones D.G., Endsley M.R., Use of Real-Time Probes for Measuring Situation Awareness, *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 14, no 4, 2004, pp. 343-367
- [129] Jones R., Connors E., Endsley M., A Framework for Representing Agent and Human Situation Awareness, *IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA)*, Miami Beach 2011
- [130] Jukes M., *Aircraft Display Systems*, Professional Engineering Publishing Ltd, UK, 2004

- [131] Kaber D.B., Endsley M.R., The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task, *Theoretical Issues in Ergonomics Sciences*, vol. 5, 2004, pp. 113-153
- [132] Kaber D.B., Onal E., Endsley M.R., Design of Automation for Telerobots and the Effect on Performance, Operator Situation Awareness, and Subjective Workload, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 10(2), 2000, pp. 409-430
- [133] Kaber D.B., Wright M.C., Prinzel III L.J., Clamann M.P., Adaptive Automation of Human-Machine System Information – Processing Functions, *Human Factors*, 47(4), 2005, pp. 730-741
- [134] Kaczorek T., *Teoria sterowania*, PWN, Warszawa 1981
- [135] Kammer I., Pascoal A., Hallberg E., Silvestre C., Trajectory Tracking for Autonomous Vehicles: An Integrated Approach to Guidance and Control, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 21(1), 1998, pp. 29-38
- [136] Katayanagi R., Pilot-Induced Oscillation Analysis with Actuator Rate Limiting and Feedback Control Loop, *AIAA 2004-4998*, 2004
- [137] Khandkar S.H., Maurer F., A Domain Specific Language to Define Gestures for Multi-Touch Applications, *The 10th Workshop on Domain-Specific Modeling*, 17-18 October 2010, Reno/Tahoe, Nevada, USA
- [138] Kiencke U., Nielsen L., *Automotive Control Systems For Engine, Driveline, and Vehicle*, Springer 2005
- [139] Kish B.A. et al., A Limited Flight Test Investigation of Pilot-Induced Oscillation due to Rate Limiting, *AIAA-97-3703*, 1997
- [140] Klyde D.H., McRuer D., Smart-Cue and Smart-Gain Concepts Development to Alleviate Loss of Control, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 32(5), 2009, pp. 1409-1417
- [141] Knecht W.R., Testing a Multidimensional Nonveridical Aircraft Collision Avoidance System, *Human Factors*, vol. 50, 2008, pp. 565-575
- [142] Kondo K., Nishikawa I., The role that the Internal Model of the Other Plays in Cooperative Behavior, *Proc. of the IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Millbrae, California, USA, 31 October-2 November 2003
- [143] Kopecki G., Pieniążek J., Tomczyk A., *Koncepcja systemu wspomagania pilota w przestrzeni ograniczeń eksploatacyjnych samolotu lekkiego*, [w:] Gruszecki J. (red.), *Wybrane zagadnienia sterowania obiektami latającymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011, s. 85-95
- [144] Korteling, J.E., van der Borg W., Partial camera automation in an unmanned air vehicle, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 27(2), 1997, pp. 256-262
- [145] Kosko B., Fuzzy Systems as Universal Approximators, *IEEE Transactions on Computers*, 43(11), 1994, pp. 1329-1333
- [146] Kot S.M., Jakubowski J., Sokołowski A., *Statystyka*, Difin, Warszawa 2011

- [147] Kozłowski W., Współpraca pilota z zaawansowanymi systemami sterowania samolotem, praca dyplomowa magisterska (promotor J. Pieniążek), WBMiL Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009
- [148] Kraiss K.F., Assisted Man-Machine Interaction, [in:] Advanced Man-Machine Interaction Signals and Communication Technology, 2006, pp. 369-397
- [149] Kułakowski K., Mouaddib A.I., What situation awareness and distributed robotics have in common?, CSL Technical Report, no 2, 2009
- [150] Kyle E.K. et.al., Transition of Attention in Terminal Area NextGen Operations Using Synthetic Vision Systems, HFES 2011: Human Factors and Ergonomics Society, 55th Annual Meeting, 19-23 September 2011, Las Vegas, NV, United States
- [151] Lam T.M., Mulder M., van Paassen M.M., Haptic Interface For UAV Collision Avoidance, International Journal of Aviation Psychology, 17(2), 2007, pp. 167-195
- [152] Lam T.M., Boschloo H.W., Mulder M., van Paassen M.M., Artificial Force Field for Haptic Feedback in UAV Teleoperation, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans, 39(6), 2009, pp. 1316-1330
- [153] Lam T.M., Mulder M., van Paassen M.M., Mulder J.A., Comparison of Control and Display Augmentation for Perspective Flight-Path Displays, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 29(3), 2006, pp. 564-578
- [154] Lam T.M., Mulder M., van Paassen M.M., Mulder J.A., van der Helm F.C.T., Force-Stiffness Feedback in Uninhabited Aerial Vehicle Teleoperation with Time Delay, Journal of Guidance, Control, And Dynamics, 32(3), 2009, pp. 821-835
- [155] Landry S.J., Flight Deck Automation, Springer Handbook of Automation, Part G, 2009, pp. 1215-1239
- [156] Lasschuit J., Lam T.M., Mulder M., Measuring and Modelling Neuromuskular System Dynamics for Haptic Interface Design, AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Hawaii 2008
- [157] Lee J.D., Geb T., Pollack E., Ecological interface design (EID) and the management of large numbers of intelligent agents, Human error and system design and management, Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 253, 2000, pp. 137-151
- [158] Lewison W.H., Elkind J.I., Studies on multi-variable manual control systems: two axis compensatory systems with compatible integrated display and control, NASA-CR-554, 1966
- [159] Liao H., Yeh S.L., Interaction between stimulus-driven orienting and top-down modulation in attentional capture, Acta Psychologica, vol. 138, 2011, pp. 52-59
- [160] Lin Y., Zhang W.J., Towards a novel interface design framework: function-behavior-state paradigm, International Journal Human-Computer Studies, vol. 61, 2004, pp. 259-297
- [161] Lindsay P.H., Norman D.A., Procesy przetwarzania informacji u człowieka, wprowadzenie do psychologii, PWN, Warszawa 1984
- [162] Loram I.D., Gollee H., Lakie M., Gawthrop P.J., Human control of an inverted pendulum: Is continuous control necessary? Is intermittent control effective? Is

- intermittent control physiological?, *The Journal of Physiology*, 589(2), 2011, pp. 307-324
- [163] Maciejowski J.M., *Predictive Control*, Delft University Press, Delft 1998
- [164] Magiera R., *Modelowanie i metody statystyki matematycznej*, Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław 2002
- [165] Makarowski R., Smolicz T., *Czynnik ludzki w operacjach lotniczych. Człowiek, możliwości i ograniczenia – uwarunkowania psychofizjologiczne*, Kosowizna, 2012
- [166] Manzey D., Reichenbach J., Onnasch L., *Human Performance Consequences of Automated Decision Aids: The Impact of Degree of Automation and System Experience*, *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 6(1), 2012, pp. 57-87
- [167] Mařík V., Pěchouček M., *Agent Technology, Collaborative Networked Organizations*, vol. 5, 2004, pp. 193-206
- [168] Mashinchi M.H., Shamsuddin S.M., *Three-Term Fuzzy Back-Propagation*, [in:] Hassaniem A.E. et.al., *Foundation of Comput. Intel.*, vol. 1, SCI 201, pp. 143-158, Springer 2009
- [169] Maturana F.P., Norrie D.H., *Distributed decision-making using the contract net within a mediator architecture*, *Decision Support Systems*, vol. 20, 1997, pp. 53-64
- [170] Maturana F.P., Carnahan D.L., Hall K.H., *Distributed Agent Software for Automation*, *Springer Handbook of Automation, Part C*, 2009, pp. 469-486
- [171] Mayer J., Cox T.H., *Evaluation of Two Unique Side Stick Controllers in a Fixed-Base Flight Simulator*, NASA/TM-2003-212042, 2003
- [172] McClumpha A.J., James M., Green R.G., Belyavin A.J., *Pilots' Attitudes to Cockpit Automation*, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 1991*, pp. 107-111
- [173] McGuinness, *Quantitative Analysis of Situational Awareness (QUASA): Applying Signal Detection Theory to True/False Probes and Self-Ratings*, 9th International Command and Control Research and Technology Symposium Copenhagen, September 2004
- [174] McKenna E., *Synthetic Vision Systems*, *Avionics Today*, 1 May 2012 (<http://www.aviationtoday.com>)
- [175] McLaughlin A.C., Simon D.A., Gillan D.J., *From Intention to Input: Motor Cognition, Motor Performance, and the Control of Technology*, *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, vol. 6, 2010, pp. 123-170
- [176] McRuer D., Graham D., Krendel E., Reisener W., *Human pilot dynamics in compensatory systems*, AFFDL-TR-65-15
- [177] McRuer D.T., Jex H.R., *A Review of Quasi-Linear Pilot Model*, *IEEE Transaction on Human Factors in Electronics*, vol. HFE-8, no 3, 1967
- [178] McRuer D.T., Magnello R.E., *Human Pilot Dynamics with Various Manipulators*, STI-TR-134-3, 1966
- [179] McRuer D.T., et.al., *Aviation Safety and Pilot Control: Understanding and Preventing Unfavorable Pilot-Vehicle Interactions*, *Committee on the Effects of*

- Aircraft-Pilot Coupling on Flight Safety, National Academy Press, Washington 1997
- [180] Menda J., Hing J.T., Ayaz H., Shewokis P.A., Izzetoglu K., Onaral B., Oh P., Optical Brain Imaging to Enhance UAV Operator Training, Evaluation, and Interface Development, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 61(1-4), 2010, pp. 423-443
- [181] Merritt S.M., Affective Processes in Human–Automation Interactions, *Human Factors*, 53(4), 2011, pp. 356-370
- [182] Metzger U., Parasuraman R., Free Flight and the Air Traffic Controller: Active Control versus Passive Monitoring, *Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 1999*, pp. 1-5
- [183] Miller S., Kirlik A., Kosorukoff A., Byrne M.D., Ecological Validity as a Mediator of Visual Attention Allocation in Human-Machine Systems, *Technical Report AHFD-04-17/NASA-04-6*
- [184] Miller S.P., Barber S., Carlson T.M., Lempia D.L., Tribble A.C., A methodology for improving mode awareness in flight guidance design, *21st Digital Avionics Systems Conference (DASC'02)*, Irvine, California, 27-31 October 2002
- [185] Mitchell I., Bayen A.M., Tomlin C.J., Validating a Hamilton-Jacobi Approximation to Hybrid System Reachable Sets, *HSCC 2001, LNCS 2034*, 2001, pp. 418-432
- [186] Moise A., Robert J.M., Model Driven Ecological Interface Creation: The Constraints Model, *Model Driven Development of Advanced User Interfaces*, Nashville, Tennessee, USA, October 1, 2007
- [187] Morawski J.M., Człowiek i technologia. Tajniki wzajemnych uwarunkowań, *Wyższa Szkoła Humanistyczna, Pułtusk 2005*
- [188] Morawski J.M., Gospodarka informacją w układzie pilot–samolot, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1994*
- [189] Moubaidin A., Obeid N., Dialogue and Argumentation in Multi-agent Diagnosis, *Studies in Computational Intelligence*, vol. 134, 2008, pp. 13-22
- [190] Mouton O.N.F., Mulder M., van Paassen M.M., Thresholds for Visual Perception of Aircraft Velocity Changes, *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 18-21 August 2008, Honolulu, Hawaii, AIAA 2008-6844
- [191] Mulder M., Veldhuijzen A., van Paassen R., Bennani S., Fly-by-wire and Tunnel-in-the-Sky Displays: Towards a Task-Oriented Control/Display System, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 5-8 August 2002, Monterey, California, AIAA 2002-4928
- [192] Müller J.P., Control Architecture for Autonomous and Interacting Agents: A survey, *LNICS, Intelligent Agent Systems Theoretical and Practical Issues*, vol. 1209, 1997, pp. 1-26
- [193] Murakami E.A.Y., Reaction time and EMG measurement applied to human control modeling, *Measurement*, vol. 43, 2010, pp. 675-683
- [194] Nęcka E., Orzechowski J., Szymura B., *Psychologia poznawcza*, Wydawn. Naukowe PWN, 2006

- [195] Niedermeier D., Lambregts A.A., Fly-by-Wire Augmented Manual Control – Basic Design Considerations, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, Brisbane, Australia, 23-28 September 2012
- [196] Norwich K.H., Information, Sensation and Perception, Biopsychology.org, 2003
- [197] Nowinski J.L., Holbrook J.B., Dismukes R.K., Human memory and cockpit operations: An ASRS study, Proc. of the 12th International Symposium on Aviation Psychology, 2003, pp. 888-893
- [198] O'Brien K.S., O'Hare D., Situational awareness ability and cognitive skills training in a complex real-world task, Ergonomics, 50(7), 2007, pp. 1064-1091
- [199] O'Hare D., Cognitive Ability Determinants of Elite Pilot Performance, Human Factors, 39(4), 1997, pp. 540-552
- [200] Oishi M., Mitchell I., Bayen A., Tomlin C., Degani A., Hybrid Verification of an Interface for an Automatic Landing, Proc. of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, CA, 10-13 December 2002
- [201] Papastavrou J.D., Lehto M.R., Improving the effectiveness of warnings by increasing the appropriateness of their information content: some hypotheses about human compliance, Safety Science, vol. 21, 1996, pp. 175-189
- [202] Parasuraman R., Managing the Future National Airspace System: Free Flight or Ground-Based Control with Increased Automation?, Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 1998, pp. 62-66
- [203] Parasuraman R., Manzey D.H., Complacency and Bias in Human Use of Automation: An Attentional Integration, Human Factors, 52(3), 2010, pp. 381-410
- [204] Parasuraman R., Sheridan T.B., Wickens C.D., A model for types and levels of human interaction with automation, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A, 30(3), 2000, pp. 286-297
- [205] Parasuraman R., Sheridan T.B., Wickens C.D., Situation Awareness, Mental Workload, and Trust in Automation: Viable, Empirically Supported Cognitive Engineering Constructs, Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 2(2), 2008, pp. 140-160
- [206] Passino K.M., Yurkovich S., Fuzzy Control, Addison-Wesley, California 1998
- [207] Pei-Ju L., Huadong W., Shih-Yi Ch., Lewis M., Scerri P., Velagapudi P., Sycara K., Kane B., Teams for Teams Performance in Multi-Human/Multi-Robot Teams, Proc. of the Human Factors And Ergonomics Society, 54th Annual Meeting, 2010, pp. 438-442
- [208] Pełczewski W., Teoria sterowania, PWN, 1980
- [209] Perkins C.D., Hage R.E., Airplane Performance Stability and Control, Wiley, 1949
- [210] Pieniążek J., Active command interfaces in fly-by-wire control, Systems Science, Wydawn. Politechniki Wrocławskiej, vol. 34, 2008, pp. 67-75
- [211] Pieniążek J., Adaptation of the Display Dynamics for Monitoring of Controlled Dynamical Processes, 3rd International Conference on Human System Interaction HSI, Rzeszów, 13-15 maja 2010

- [212] Pieniążek J., Automation in Unmanned Aircraft System, III Międzynarodowa Konferencja „Naukowe Aspekty Bezzałogowych Aparatów Latających”, Cedzyna, 7-9 maja 2008
- [213] Pieniążek J., Automatyka – wspomaganie czy zastępowanie pilota?, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 279, Mechanika, z. 83, 3/2011
- [214] Pieniążek J., Dobór zadania testowego podczas badania interfejsu pilot–samolot, Journal of Aeronautica Integra, Sieć Naukowa Aeronautica Integra, Rzeszów, vol. 1, no 3, 2008, s. 79-86
- [215] Pieniążek J., Improvement of control accuracy by display aids, Conference on Human System Interaction HSI'08, Kraków 2008
- [216] Pieniążek J., Re-configurable control system for autonomous unmanned aircraft, 7th IFAC Symposium on Robot Control SYROCO'03, Politechnika Wroclawska, Wrocław, t. 1, 2003, s. 353-358
- [217] Pieniążek J., Sterowanie na trajektorii, XIV Konferencja Automatyki, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra, 24-27 czerwca 2002, t. 1, s. 129-131
- [218] Pieniążek J., Sterowanie samolotem bezzałogowym podczas rozpoznania terenu, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2000
- [219] Pieniążek J., Wykorzystanie interfejsu CAN w układach sterowania samolotami ogólnego przeznaczenia, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, 1997
- [220] Pieniążek J., Ciecinski P., Model samolotu dla zadań syntezy układów sterowania, Mechanika w Lotnictwie – XI, PTMTS, Warszawa 2004, s. 287-300
- [221] Pieniążek J., et.al., Metodyka syntezy charakterystyk obciążenia organów sterowych w układach sterowania samolotem przyjaznym dla pilota, Projekt N N509 0828 33
- [222] Pieniążek J. et.al., Opracowanie autonomicznego systemu sterowania bezzałogowym obiektem latającym (zad. 3), [w:] Orkisz M., Demonstrator zaawansowanych technologii lotniczych – wyposażenie pokładowe, Projekt 0576/R/2/T02/2007/03
- [223] Pope S., Piston Engine Technology, Flying International, 6 April 2012
- [224] Poulton E.C., Tracking Skills and Manual Control, Academic Press, 1974
- [225] Pratt R.W. (ed.), Flight Control Systems, Progress in Astronautics & Aeronautics, AIAA, 2000
- [226] Prinzel L.J., Kramer L.J., Synthetic Vision Systems, NASA Report LF99-1309, 2009
- [227] Pritchett A.R., Aviation Automation: General Perspectives and Specific Guidance for the Design of Modes and Alerts, Reviews of Human Factors and Ergonomics, vol. 5, 2009, pp. 82-113
- [228] Proud R., Hart J., Mrozinski R., Methods for Determining the Level of Autonomy to Design into a Human Spaceflight Vehicle: A Functional Specific Approach, Performance Metrics for Intelligent Systems, PerMIS '03, NIST Special Publication 1014
- [229] Putzer H., Onken R., COSA – A Generic Approach towards a Cognitive System Architecture, in the Cognitive Work Process: Automation and Interaction, 8th European Conference on Cognitive Science Applications in Process Control, CSAPC'01, Munich, Germany, 24-26 September 2001

- [230] Ramsey J.W., Integrated Modular Avionics: Less is More, Avionics Magazine, 1 February 2007
- [231] Rasmussen J., A taxonomy of Analysis of Cognitive Work, 1993
- [232] Rasmussen J., Skills, rules, and knowledge; Signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 13, 1983, pp. 257-266
- [233] Rasmussen S.J., Shima T., Tree search algorithm for assigning cooperating UAVs to multiple tasks, Int. J. Robust Nonlinear Control, 2007
- [234] Rogalski T., Rzucidło P., Tomczyk A., Kształtowanie właściwości pilotażowych samolotu z odległościowym układem sterowania. Symulacja w ujęciu nieliniowym, Mechanika w Lotnictwie – X, PTMTS, Warszawa 2002, s. 411-420
- [235] Rogers R., Flight Test Results of the Controlled Flight Into Terrain Avoidance Maneuver in Fly-By-Wire Transports, Air Line Pilots Association, Airworthiness Performance Evaluation and Certification Committee, 1999
- [236] Rogers R., Pilot authority and aircraft protections, Air Line Pilots Association, Airworthiness Performance Evaluation and Certification Committee, 1999
- [237] Rong J., Spaeth T., Valasek J., Small Aircraft Pilot Assistant: Onboard Decision Support Systems for SATS Aircraft, in AIAA 5th Aviaton, Technology, Integration, and Operation Conference, 26-28 September 2005, Virginia, AIAA 2005-7384, 2005
- [238] Roscoe S., Corl L., LaRoche J., Keeping the Picture, The measurement of Flow Control, Helio Press, Canada 1999
- [239] Roscoe S., Corl L., LaRoche J., Predicting Human Performance, 5.0 Edition, Helio Press, Canada 2001
- [240] Rushby J., Anomalies in Digital Flight Control Systems, SRI International Computer Science Laboratory, <http://www.csl.sri.com/users/rushby/anomalies.html>
- [241] Rzucidło P., Oscylacje indukowane przez pilota w układzie pośredniego sterowania samolotem, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007
- [242] Sachs G., Tunnel/predictor display with two-axis control coordination and simplification, Aerospace Science and Technology, vol. 7, 2003, pp. 621-631
- [243] Salmon P.M., Stanton N.A., Walker G.H., Jenkins D.P., Distributed Situation Awareness, Theory, Measurement and Application to Teamwork, Ashgate 2009
- [244] Salmon P., Stanton N., Walker G., Green D., Situation Awareness Measurement: A review of applicability for C4I environments, Applied Ergonomics, vol. 37, 2006, pp. 225-238
- [245] Salmon P. et.al., Measuring Situation Awareness during Command and Control Activity: A Comparison of Measures Study, Human Factors Integration Defense Technology Centre, Brunel University, 2007
- [246] Salzer Y., Oron-Gilad T., Ronen A., Parmet Y., Vibrotactile „On-Thigh” Alerting System in the Cockpit, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, vol. 53, 2011, pp. 118-131

- [247] Sarter N.B., Woods D.D., „From Tool to Agent”: The Evolution of (Cockpit) Automation and Its Impact on Human-Machine, Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society, Annual Meeting 1995, pp. 79-83
- [248] Sarter N.B., Woods D.D., Pilot Interaction With Cockpit Automation II: An Experimental Study of Pilots' Mode Awareness of the FMS, The international Journal of Aviation Psychology, vol. 4, 1994, pp. 1-24
- [249] Sauter J.A., Mathews R.S., Yinger A., Robinson J.S., Moody J., Heterogeneous Unmanned Vehicle Collaborative Control Demonstration, Proc. of AUVSI's Unmanned Systems North America 2007 Conference, Washington, DC
- [250] Schulte A., Mission Management and Crew Assistance for Military Aircraft – Cognitive Concepts and Prototype Evaluation, [in:] Tactical Decision Aids and Situational Awareness, RTO-EN-019, AC/323(SCI-113)TP/41, 2002
- [251] Seow S.S., Information Theoretic Models of HCI: A comparison of the Hick-Hayman Law and Fitts' Law, Human-Computer Interaction, vol. 20, 2005, pp. 315-352
- [252] Sethumadhavan A., Effects of First Automation Failure on Situation Awareness and Performance in an Air Traffic Control Task, Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society, Annual Meeting 2011, pp. 350-354
- [253] Shannon C.E., A Mathematical Theory of Communication, The Bell System Technical Journal, vol. 27, <http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf>, 1948
- [254] Sharit J., Perspectives on computing aiding in cognitive work domains: toward predictions of effectiveness and use, Ergonomics, vol. 46, no 1-3, 2003, pp. 126-140
- [255] Sheridan T.B., Humans and Automation. System Design and Research Issues, Wiley, HFES, 2002
- [256] Sheridan T.B., Next Generation Air Transportation Systems: Human-Automation Interaction and Organizational Risks, 2nd Symposium on Resilience Engineering, Juan-les-Pins, France, 8-10 November 2006
- [257] Sheridan T.B., Reflections on Information and Information Value, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 25, no 1, 1995, pp. 194-196
- [258] Sheridan T.B., Parasuraman R., Human-Automation Interaction, Reviews of Human Factors and Ergonomics, vol. 1, 2005, pp. 89-128
- [259] Sibilski K., Modelowanie i symulacja dynamiki ruchu obiektów latających, Oficyna Wydawnicza MH, Warszawa 2004
- [260] Snell S.A., Flight Control Design With Rate Saturating Actuators, AIAA-97-3778, 1997
- [261] Soderstrom T., Stoica P., Identyfikacja systemów, PWN, Warszawa 1997
- [262] Solodilova I., Lintern G., Johnston N., The Modern Commercial Cockpit as a Multi-Dimensional, Information-Action Workspace, Proc. of the 12th International Symposium on Aviation Psychology, 14-17 April 2003, Dayton, Ohio, USA
- [263] Stanton N.A., Marsden P., From Fly-by-Wire to Drive-by-Wire: Safety Implications of Automation in Vehicles, Safety Science, 24(1), 1996, pp. 35-49

- [264] Stanton N.A., Walker G., Jenkins D., Models of Command and Control, [in:] Harris D., Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, LNAI 4562, Springer, 2007, pp. 600-608
- [265] Stanton N.A., Stewart R., Harris D., Houghton R.J., Baber C., McMaster R., Salmon P., Hoyle G., Walker G., Young M.S., Linsell M., Dymott R., Green D., Distributed situation awareness in dynamic systems: theoretical development and application of an ergonomics methodology, *Ergonomics*, 49(12), 2006, pp. 1288-1311
- [266] Stassen H.G., Johannsen G., Moray N., Internal Representation, Internal Model, Human Performance Model and Mental Workload, *Automatica*, vol. 26, no 4, 1990, pp. 811-820
- [267] Steck J.E., Rokhsaz K., Pesonen U., Pilot Evaluation of an Adaptive Controller on General Aviation SATS Testbed Aircraft, AIAA 2004-5239, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Providence, Rhode Island, 2004
- [268] Stevens B.L., Lewis F.L., Aircraft Control and Simulation, Wiley, 2004
- [269] Stock M., CAN aerospace – interface specification for airborne CAN applications V 1.7, Stock Flight Systems, 12.01.2006
- [270] Sulistyawati K., Wickens C.D., Chui Y.P., Exploring the Concept of Team Situation Awareness in a Simulated Air Combat Environment, *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 3(4), 2009, pp. 309-330
- [271] Sutherland J.W., Directive decision devices: Reversing the locus of authority in human-computer associations, *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 75, 2008, pp. 1068-1089
- [272] Svenmarckt P., Dekker S., Decision support in fighter aircraft: from expert systems to cognitive modelling, *Behaviour & Information Technology*, 22(3), 2003, pp. 175-184
- [273] Sweet B.T., The Identification and Modelling of Visual Cue Usage in Manual Control Task Experiments, NASA/TM-1999-208798
- [274] Szczepański C., Koncepcja symulatora badawczo-konstrukcyjnego do projektowania kokpitów wojskowych statków powietrznych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, nr 238, *Mechanika*, z. 71, 2007
- [275] Szczepański C., Research Simulator and Method of Optimizing the Human-Machine Interface at Military Aircraft, AIAA Modelling and Simulation Conference and Exhibit, 20-23 August 2007, AIAA 2007-6560
- [276] Terelak J.F., Człowiek i stres, Oficyna Wydawnicza Branta, Bydgoszcz-Warszawa 2008
- [277] Thatcher S., Jain L., Fyfe C., An Intelligent Aircraft Landing Support System, Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3213, 2004, pp. 74-79
- [278] Tikk D., Kóczy L.T., Gedeon T.D., A survey on the universal approximation and its limits in soft computing techniques, *Int. J. of Approximate Reasoning*, 33(2), 2003, pp. 185-202
- [279] Tomczyk A., Aircraft Handling Characteristics Modification Using the Digital Flight Control System, *Research Bulletin of the Institute of Aeronautics and*

- Applied Mechanics, Warsaw University of Technology, no 7, Part II, 1997, pp. 113-118
- [280] Tomczyk A., Concept for Simplified Control of General Aviation Aircraft, SAE/AIAA, Paper no 985551, SAE 1988, Transactions, Journal of Aerospace, 1999
- [281] Tomczyk A., Control augmentation system for remote steering UAV, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, Brisbane, Australia, 23-28 September 2012
- [282] Tomczyk A., Faciliated Airplane – project and preliminary in-flight experiments, Aerospace Science and Technology, vol. 8, 2004, pp. 469-477
- [283] Tomczyk A., Kształtowanie właściwości pilotażowych samolotów ogólnego przeznaczenia, [w:] Gruszecki J. (red.), Wybrane zagadnienia sterowania obiektami latającymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011
- [284] Tomczyk A., Pokładowe cyfrowe systemy sterowania samolotem, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999
- [285] Tomczyk A., Shaping Indirect Flight Control Systems Properties for General Aviation Aircraft, Journal of Aerospace Engineering, 24(1), 2011, pp. 59-71
- [286] Tomczyk A., Rzucidło P., Systemy pośredniego sterowania dla samolotów ogólnego przeznaczenia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011
- [287] Tomczyk A. i in., Badania systemu pośredniego sterowania kształtującego nowe właściwości pilotażowe samolotów ogólnego przeznaczenia, Projekt badawczy KBN 5 T12C 042 25, Rzeszów 2003-2006
- [288] Torenbeek E., Wittenberg H., Flight Physics, Springer, 2009
- [289] Traverse P., Lacaze I., Souyris J., Airbus Fly-By-Wire: A Total Approach to Dependability, Building the Information Society, IFIP International Federation for Information Processing, vol. 156, 2004, pp. 191-212
- [290] Trojanek P., Zieliński C., Dekompozycja i specyfikacja systemów robotowych, XVIII Konferencja Systemy Czasu Rzeczywistego, Czarna, 12-15 listopada 2011
- [291] Tuominen E., Kangassalo M., Hietala P., Raisamo R., Peltola K., Proactive Agents to Assist Multimodal Explorative Learning of Astronomical Phenomena, Advances in Human-Computer Interaction, vol. 2008, Article ID 387076
- [292] Tyler S.W., Neukom C., Logan M., Shively J., The MIDAS human performance model, Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society, 42nd Annual Meeting 1998, pp. 320-324
- [293] Upton C., Doherty G., Extending Ecological Interface Design Principles: A Manufacturing Case Study, International Journal of Human Computer Studies, 66(4), 2008, pp. 271-286
- [294] Vachon F., Lafond D., Vallières B.R., Rousseau R., Tremblay S., Supporting Situation Awareness: A Tradeoff between Benefits and Overhead, IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), Miami Beach, FL, 2011

- [295] Van Dam S.B.J., Mulder M., Van Paassen R., Ecological Interface Design of Airborne Conflict Support in Flexible Use Airspace, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference & Exhibit, 15-18 August 2005
- [296] Van Den Hof P.M.J., Schrama R.J., Identification and Control – Closed-loop Issues, *Automatica*, 31(12), 1995, pp. 1751-1770
- [297] Van der Stigchel S., Belopolsky A.V., Peters J.C., Wijnen J.G., Meeter M., Theeuwes J., The limits of top-down control of visual attention, *Acta Psychologica*, vol. 132, 2009, pp. 201-212
- [298] Vavruck I., Prasad J.V.R., Calise A.J., Adaptive Limit Detection and Avoidance for Carefree Maneuvering, AIAA 2001-4003
- [299] Vicente K.J., Ecological Interface Design: Progress and Challenges, *Human Factors*, 44(1), 2002, pp. 62-78
- [300] Vicente K.J., Rasmussen J., Ecological Interface Design: Theoretical Foundations, *IEEE Trans. on SMC*, 22(2), 1992, pp. 589-606
- [301] Visioli A., A new design for a PID plus feedforward controller, *Journal of Process Control*, vol. 14, 2004, pp. 457-463
- [302] Wagner D., Birt J.A., Snyder M., Duncanson J.P., *Human Factors Design Guide*, DOT/FAA/CT-96/1, 1996
- [303] Wan A.D., Braspenning P.J., Vreeswijk G.A.W., Limits to ground control in autonomous spacecraft, *Telematics and Informatics*, 12(3/4), 1995, pp. 247-259
- [304] Wickens C.D., Multiple Resources and Mental Workload, *Human Factors*, 50(3), 2008, pp. 449-455
- [305] Wickens C.D., Gopher D., Control Theory Measures of Tracking as Indices of Attention Allocation Strategies, *Human Factors*, 19(4), 1977, pp. 349-365
- [306] Williams K.W., An Assessment of Pilot Control Interfaces for Unmanned Aircraft, report DOT/FAA/AM-07/8, Civil Aerospace Medical Institute FAA, 2007
- [307] Wooldridge M., *An Introduction to MultiAgent Systems*, Wiley, 2009
- [308] Wykowska A., Schubö A., Irrelevant singletons in visual search do not capture attention but can produce nonspatial filtering costs, *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 23, 2011, pp. 645-660
- [309] Yager R.R., Kreinovich V., Universal Approximation Theorem for Uninorm-Based Fuzzy Systems Modeling, Departmental Technical Reports (CS), Paper 497, 2002
- [310] Yavrucuk I., Prasad J.V.R., Unnikrishnan S., Envelope Protection for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 32(1), 2009, 248-261
- [311] Yavrucuk I., Unnikrishnan S., Prasad J.V.R., Envelope Protection in Autonomous Unmanned Aerial Vehicles, American Helicopter Society, 59th Annual Forum, Phoenix, Arizona, 6-8 May 2003
- [312] Zaal P.M.T., Pool D.M., de Bruin J., Mulder M., van Paassen M.M., Use of Pitch and Heave Motion Cues in a Pitch Control Task, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 32(2), 2009, pp. 366-377

- [313] Zaal P.M.T., Pool D.M., Mulder M., van Passen M.M., Multimodal Pilot Control Behavior in Combined Target-Following Disturbance-Rejection Tasks, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 32, 2009, pp. 1418-1428
- [314] Zadeh M.H., Factors Affecting Human Force Perception and Performance in Haptic-Enabled Virtual Environments, PhD Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2009
- [315] Zhai S., Investigation of Feel for 6DOF Inputs: Isometric and Elastic Rate Control for Manipulation in 3D Environments, *Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society, 37th Annual Meeting*, 1993
- [316] Zhang Y., Luximon A., Subjective mental workload measures, *Ergonomia*, vol. 27, no 3, 2005, pp. 199-206
- [317] Zhu Y., *Multivariable System Identification for Process Control*, Elsevier, 2001
- [318] Zieliński P., Biernacki M., Analiza psychometryczna polskiego przekładu narzędzia do subiektywnej oceny obciążenia zadaniowego NASA-TLX, *Polski Przegląd Medycyny Lotniczej*, 3(16), 2010, s. 219-239
- [319] Zipfel P., *Modeling and Simulation of aerospace Vehicle Dynamics*, AIAA Blacksburg, Virginia, 2007
- [320] Zolgard A., Early warning and prediction of flight parameter abnormalities for improved system safety assesment, *Reliability Engineering & System Safety*, 17, 2002, pp. 19-27
- [321] A Tool for the Assessment of the Impact of Change in Automated ATM Systems on Mental Workload, European Organisation for the Safety of Air Navigation, EUROCONTROL, 2004
- [322] ARINC664 – Avionics Full Duplex Switched Ethernet, ARINC, 2005
- [323] CAN specification Version 2.0. Robert Bosch GmbH, 1991
- [324] Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes, CS-25, EASA, Amendment 11, 4 July 2011
- [325] Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes, CS-23, EASA, Amendment 2 (Corrigendum), 28 September 2010
- [326] Fuzzy Logic Toolbox™ 2, User's Guide, Mathworks, 2010
- [327] General Aviation FADEC: Making a Piston Engine Act Like a Turbine, *Aviation Today*, 1.07.2007
- [328] Joint Aviation Authorities Airline Transportation Pilot's Licence, Theoretical Knowledge Manual, 040 Human Performance & Limitations, Oxford Aviation Service Ltd., 2005
- [329] Statistic Toolbox™ Users Guide, MathWorks, 2011
- [330] StatSoft Electronic Statistic Textbook, <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>
- [331] Task Load Index v 1.0, NASA Ames Research Center, Moffett Field California, <http://humansystems.arc.nasa.gov>
- [332] The USAF Stability and Control Digital DATCOM, vol. 1, Users Manual, AFFDL-TR-79-3032
- [333] xPC Target™ 4 User's Guide, Mathworks, 2010

-
- [334] http://www.nist.gov/el/isd/ks/autonomy_levels_workshops.cfm
 - [335] <http://www.sat-rdmp.eu>
 - [336] <http://www.vrealities.com>
 - [337] Wikipedia (en.wikipedia.org)
 - [338] www.scarlettproject.eu

KSZTAŁTOWANIE WSPÓŁPRACY CZŁOWIEKA Z LOTNICZYMI SYSTEMAMI STEROWANIA

Streszczenie

Postępująca automatyzacja procesu sterowania ruchem i wyposażeniem samolotu skutkuje zmianą roli pilota. Staje się on operatorem systemów, podczas gdy w samolotach pozbawionych systemów automatycznych realizuje bezpośrednio proces sterowania. Odpowiedzialność za bezpieczeństwo i poprawność realizacji zadań wymusza na pilocie (a także na operatorze stacji kontroli lotu samolotu bezzałogowego) konieczność kontroli nie tylko samego samolotu, ale także systemów samolotu, łącznie z układami automatyki.

Wspomaganie realizacji zadań sterujących i kontrolnych jest koniecznością, gdy powiększany jest zakres realizowanych zadań, kiedy dąży się do podniesienia niezawodności działania oraz do obniżenia wymagań stawianych człowiekowi. Aby wprowadzane rozwiązania techniczne efektywnie wspomagały realizację zadań przez człowieka, należy uwzględnić właściwości człowieka. Dlatego w niniejszej monografii podjęto temat metodyki kształtowania charakterystyk systemów sterowanych przez człowieka.

Podstawą do określenia możliwych sposobów wspomagania człowieka są modele elementów systemu składającego się z części technicznej i człowieka. Model opisujący funkcjonowanie człowieka, który posłużył do określenia wpływu różnych rozwiązań układów automatyki oraz interfejsów na działania człowieka, wynika z opisów procesu przetwarzania informacji w zadaniach sterowania. Zaprezentowane zostały metody kształtowania wybranych charakterystyk elementów systemu wraz z wynikami testów. Uzyskane efekty pozwalają na stwierdzenie, że dopasowanie charakterystyk części technicznej przez odpowiednie formowanie sygnałów oraz automatyzację skutkuje redukcją poziomu obciążenia zadaniowego oraz wzrostem efektywności realizacji celu zadania.

Połączenie wielu cząstkowych metod wspomagania człowieka prowadzi do koncepcji asystenta pilota (lub ogólnie asystenta operatora). Projekt asystenta na etapie założeń definiuje rolę wprowadzanych systemów jako pomagających, a zatem zwraca uwagę, że poza techniczną doskonałością należy uwzględniać efekty interakcji pomiędzy człowiekiem a częścią techniczną systemu. W zaproponowanej strukturze asystenta zostały wprowadzone aktywne organa sterowe. W efekcie, w procesie sterowania asystent współdziała z człowiekiem w formie dialogu. Taka forma współpracy, zapewniając nadrzędną rolę człowieka (czyli nie ograniczając możliwości działania), umożliwia zarówno wykonywanie procesu sterowania w trybie automatycznym, jak i kontrolowanie czynności człowieka podczas sterowania ręcznego.

Dokonany przegląd literatury, dotyczącej różnych zagadnień interakcji w procesie sterowania ręcznego i zautomatyzowanego, oraz przeprowadzone analizy i zaprezentowane wyniki badań powinny uświadomić projektantom systemów sterowania dla człowieka konieczność uwzględniania wiedzy o człowieku. Zaprezentowane metody kształtowania charakterystyk systemu mają natomiast ułatwić praktyczną implementację.

HUMAN-AUTOMATION COOPERATION IN AIRPLANE CONTROL

Summary

The progress in automation of the aircraft and aircraft equipment changes of pilot's tasks. He becomes an operator of systems when in planes without automation he realizes directly control process. Responsibility for security and correctness of control extorts on pilot (and also on the operator of the flight control station of the unmanned aircraft) necessity to supervise of not only the plane itself but also systems of the plane and auto-matics.

The aid for control and supervision is a necessity when the range of realized tasks is enlarged, when the reliability should be increased and also when the decrease of the human abilities and training is assumed. Humans' properties should be considered in the design of the technical part of the system. This monograph undertake the methodology of the design of characteristics of manually controlled systems.

Models of elements of the system consisting of a technical part and human are bases to determination of possible aids. The models of human information processing and effectors dynamics are used for the prediction of the influence of various technical solutions on the human control activity. There are presented selected methods of forming of the technical part of control system. Effects obtained in laboratory tests lets on state that, matching characteristics of the technical part and human through appropriate signals processing and automation effectively reduce the level of workload and improves task accomplishment quality.

The idea of joining together many partial aiding methods is accomplished in the pilot assistant (or generally the human-operator assistant).

The general project of the assistant defines the automation as an additional crew member so more important factor of its operation is proper cooperation with human than technical perfectness in control realization.

In the proposed structure of the assistant active control interfaces enables new forms of the dialogue between human and automation. Such form of the cooperation assuring the superiority human (that is to say not limiting human activities) makes possible both to performs control in the automatic mode and to supervises activity of the human control actions.

Carried out review of the literature concerning of various problems of the interaction in the manual and automatized control and also carried out analyses and presented findings should enlighten on designers of control systems for humans necessity of taking into account of the knowledge about human. Presented methods are direct propositions of practical implementations.