



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

**WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I TRANSPORTU**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marta Maciejewska

**Zwiększanie efektywności szkoleń
w lotnictwie ogólnym
za pomocą autorskiej metody
oceny stanu psychofizycznego kandydata**

Promotor: Prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski

Promotor pomocniczy: dr inż. Marta Galant-Gołębiewska

POZNAŃ, 2023

Spis treści

Streszczenie	3
Summary.....	4
Spis skrótów i oznaczeń	5
1. Wprowadzenie do tematyki rozprawy	8
2. Problemy badawcze oraz cel i zakres pracy	15
2.1. Problemy badawcze	15
2.2. Cel i zakres pracy.....	16
3. Charakterystyka szkoleń w lotnictwie ogólnym	18
3.1. Licencjonowanie pilotów w wybranych obszarach szkoleń lotniczych	18
3.2. Analiza wytycznych do programów szkoleń oraz egzaminów.....	30
4. Analiza dostępnych metod z zakresu oceny niezawodności człowieka oraz monitorowania stanu psychofizycznego	35
4.1. Metody oceny niezawodności człowieka	35
4.2. Metody określania stanu psychofizycznego	38
4.3. Wielokryterialny dobór metod do dalszych badań	45
5. Badania stanu psychofizycznego ucznia-pilota oraz ucznia-operatora	50
5.1. Metodyka badań.....	50
5.2. Analiza i wyniki badań dla obszaru szkolenia UAVO	55
5.3. Analiza i wyniki badań dla obszaru szkolenia PPL(A)	64
6. Próba obiektywizacji oceny uczniów w podstawowych szkoleniach GA	71
6.1. Metodyka oceny stanu psychofizycznego uczniów.....	71
6.2. Propozycja usprawnienia podstawowych szkoleń lotniczych GA	76
6.3. Pierwsza próba zastosowania opracowanej metody	79
6.4. Sformułowanie zaleceń dla Ośrodków Szkolenia Lotniczego ATO	82
7. Zakończenie	85
7.1. Podsumowanie zawartości rozprawy.....	85
7.2. Wnioski końcowe	87
7.3. Kierunki dalszych prac	88
Literatura	90
ZAŁĄCZNIK I.....	98

Streszczenie

Niniejsza rozprawa dotyczy zwiększania efektywności szkoleń w lotnictwie ogólnym za pomocą opracowanej metody oceny stanu psychofizycznego pilota. W ramach realizacji tematu rozprawy postanowiono podjąć próbę rozwiązania problemu badawczego, jakim jest obiektywizacja oraz sformułowanie zaleceń dotyczących oceny stanu psychofizycznego uczniów w trakcie szkolenia lotniczego.

Na początku realizacji celu pracy scharakteryzowano obszar lotnictwa ogólnego w Polsce oraz przedstawiono najważniejsze regulacje prawne, dotyczące szkoleń w lotnictwie ogólnym, tak by móc wprowadzić pojęcie podstawowych szkoleń lotniczych. Kolejno została dokonana analiza metod oceny niezawodności człowieka oraz oceny stanu psychofizycznego, w celu dobrania odpowiednich technik badawczych, co zrealizowano przy wykorzystaniu metody wielokryterialnego doboru.

Następnym etapem realizacji tematyki rozprawy było przeprowadzenie badań w warunkach rzeczywistych w obszarze podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego. Na podstawie zebranych danych oraz wykonanych analiz możliwe było przygotowanie modelu dokonującego oceny stanu psychofizycznego ucznia (model SPU) przy użyciu logiki rozmytej. Wykorzystując model SPU opracowana została metoda SPU oraz dedykowany do niej system oceny, docelowo stosowany przez ośrodki szkolenia lotniczego, co stanowi najważniejszy punkt rozprawy.

Efektem końcowym rozprawy jest propozycja modyfikacji podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego, uwzględniająca wykorzystanie opracowanej metody SPU oraz sformułowanie zaleceń dotyczących przeprowadzania szkoleń podstawowych dla certyfikowanych ośrodków szkolenia lotniczego. W podsumowaniu przedstawiono najważniejsze wnioski i kierunki dalszych prac.

W wyniku zrealizowanych zadań cel rozprawy został osiągnięty, a odpowiedź na postawiony problem badawczy uzyskana.

Summary

This dissertation concerns increasing the effectiveness of training in general aviation using the developed method of assessing the pilot's psychophysical state.

As part of the dissertation, it was decided to attempt to solve the research problem, which is objectification and to formulate recommendations regarding the assessment of the psychophysical state of students during aviation training. At the beginning of the work, the area of general aviation in Poland was characterized and the most important legal regulations regarding training in general aviation were presented, so that the concept of basic aviation training could be introduced. Subsequently, the methods of assessing human reliability and the psychophysical state were analyzed in order to select appropriate research techniques, which was carried out using the multi-criteria selection method. The next stage of the dissertation was to focus on research in real conditions in the area of basic general aviation training.

On the basis of the collected data and the analyzes performed, it was possible to prepare a model assessing the psychophysical state of a student (SPU model) using fuzzy logic. Using the SPU model, the SPU method was developed and the evaluation system dedicated to it, ultimately used by Aviation Training Centers, which is the most important point of the dissertation.

The final result of the dissertation is a proposal to modify basic general aviation training, taking into account the use of the developed SPU method and formulating recommendations for conducting basic training for certified aviation training centers. The work was summarized and the most important conclusions and directions for further work were presented.

The topic of the dissertation was carried out and the answer to the research problem was obtained.

Spis skrótów i oznaczeń

A	ang. <i>Aeroplane</i> – samolot
AFISC	ang. <i>Aerodrome Flight Information Service Communications</i> – świadectwo kwalifikacji informatora lotniskowej służby informacji powietrznej
AG	ang. <i>Gyroplane</i> – wiatrakowiec
AIP	ang. <i>Aeronautical Information Publication</i> – zbiór informacji lotniczych
AMC	ang. <i>Acceptable Means of Compliance PART FCL</i> – akceptowalne środki zgodności do PART FCL
ANS/AUN	ang. <i>Autonomic Nervous System</i> – autonomiczny układ nerwowy
AOPA	ang. <i>Aircraft Owners and Pilots Association</i> – Stowarzyszenie Właścicieli i Pilotów Samolotów
ATC	ang. <i>Air Traffic Control</i> – kontrola ruchu lotniczego
ATO	ang. <i>Approved Training Organisations</i> – certyfikowany ośrodek szkolenia lotniczego
ATPL	ang. <i>Airline Transport Pilot License</i> – licencja pilota liniowego
B	ang. <i>Balloon</i> – balon
BPL	ang. <i>Balloon Pilot License</i> – licencja pilota balonowego
BSP/UAV	ang. <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> – bezzałogowy statek powietrzny
BVLOS	ang. <i>Beyond Visual Line of Sight</i> – poza zasięgiem wzroku
CAT	ang. <i>Commercial Air Transport</i> – lotnictwo zarobkowe (komercyjne)
CPL	ang. <i>Commercial Pilot License</i> – licencja pilota zawodowego
EASA	ang. <i>European Union Aviation Safety Agency</i> – Agencja Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego
EBT	ang. <i>Evidence Based Training</i> – szkolenie oparte na dowodach
ECAC	ang. <i>European Civil Aviation Conference</i> – Europejska Konferencja Lotnictwa Cywilnego
EEG	ang. <i>electroencephalography</i> – elektroencefalografia
EKG	ang. <i>electrocardiography</i> – elektrokardiografia
FDL	ang. <i>Flight Dispatcher License</i> – licencja dyspozytora lotniczego
FEL	ang. <i>Flight Engineer License</i> – licencja mechanika pokładowego
FI	ang. <i>Flight Instructor</i> – instruktor lotniczy
FIR	ang. <i>Flight Information Region</i> – Rejon Informacji Powietrznej
FIS	ang. <i>Flight Information Services</i> – Służba Informacji Powietrznej
FISC	ang. <i>Flight Information Service Communications</i> – świadectwo kwalifikacji informatora służby informacji powietrznej
FNL	ang. <i>Flight Navigation License</i> – licencja nawigatora lotniczego
FSTD	ang. <i>Flight Simulation Training Device</i> – szkoleniowe urządzenie symulacji lotu
GA	ang. <i>General Aviation</i> – lotnictwo ogólne
GM	ang. <i>Guidance Material</i> – wytyczne
GND	ang. <i>Ground level</i> – poziom ziemi
GSI	ang. <i>Global Silhouette Index</i> – całkowity indeks sylwetkowy
H	ang. <i>Helicopter</i> – śmigłowiec
HGP	ang. <i>Glider Pilot License</i> – świadectwo kwalifikacji pilota lotni
HR	ang. <i>Heart Rate</i> – rytm serca (tętno)

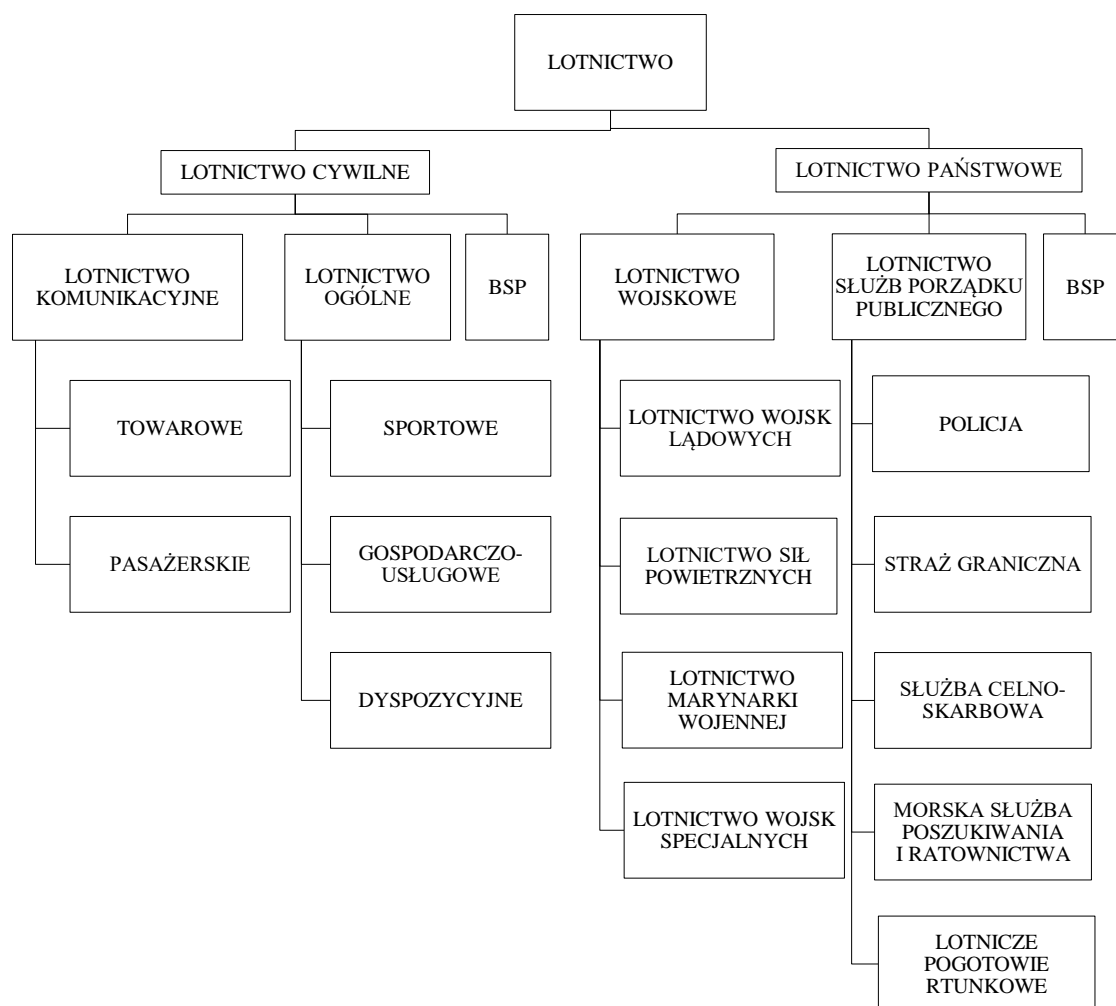
HRA	ang. <i>Human Reliability Analysis</i> – analiza niezawodności człowieka
HRV	ang. <i>Heart Rate Variability</i> – zmienność rytmu serca/częstotliwość pracy serca
HRVI	ang. <i>Heart Rate Variability Index</i> – indeks zmienności rytmu serca
IATA	ang. <i>International Air Transport Association</i> – Międzynarodowe Zrzeszenie Przewoźników Powietrznych
IBI	ang. <i>InterBeat Intervals</i> – interwały między kolejnymi uderzeniami serca
ICAO	ang. <i>International Civil Aviation Organization</i> – Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego
IFR	ang. <i>Instrument Flight Rules</i> – przepisy dla lotów według wskazań przyrządów
IMC	ang. <i>Instrument Meteorological Conditions</i> – warunki meteorologiczne, w których nie jest możliwe wykonywanie lotów VFR
JAA	ang. <i>Joint Aviation Authorities</i> – Zrzeszenie Władz Lotniczych
LAPL	ang. <i>Light Aircraft Pilot Licence</i> – licencja pilota rekreacyjnego
LTV	ang. <i>Long Term Variability</i> – zmienność długoterminowa
METAR	ang. <i>Meteorological Terminal Air Report</i> – raport meteorologiczny lotniska
MPL	ang. <i>Multi-Crew Pilot License</i> – pilot samolotowy w załodze wieloosobowej
MR	ang. <i>multirotor</i> – wielowirnikowiec
MTOM	ang. <i>Maximum Take Off Mass</i> – maksymalna masa do startu
NM	ang. <i>Nautical Miles</i> – mile morskie
NOTAM	ang. <i>Notices to Airmen</i> – depesza telekomunikacyjna Kierownictwa Lotów
NSTS	ang. <i>National Standard Scenario</i> – krajowy scenariusz standardowy
PART-FCL	ang. <i>Part Flight Crew Licensing</i> – licencjonowanie personelu lotniczego
PANSA/PAŻP	ang. <i>Polish Air Navigation Services Agency</i> – Polska Agencja Żeglugi Powietrznej
PGP	ang. <i>Paraglider Pilot License</i> – świadectwo kwalifikacji pilota paralotni
PHGP	ang. <i>Powered Hang Glider License</i> – świadectwo kwalifikacji pilota motolotni
PJ	ang. <i>Parachute Jumper</i> – świadectwo kwalifikacji skoczka spadochronowego
PPL	ang. <i>Private Pilot License</i> – licencja pilota turystycznego
RMSSD	ang. <i>Root Mean Square of Successive Differences between RR</i> – pierwiastek kwadratowy z sumy różnic pomiędzy poszczególnymi RR
R-R	ang. <i>R-R interval</i> – interwał R-R
S	ang. <i>Glider</i> – szybowiec
SA	ang. <i>Situational Awareness</i> – świadomość sytuacyjna
SAW	ang. <i>Simple Additive Weighting Method</i> – prosta metoda wag addytywnych
SD	ang. <i>Standard Deviation</i> – odchylenie standardowe

SDNN	ang. <i>Standard Deviation for NN interval</i> – odchylenie standardowe interwałów NN
SD1	ang. <i>Standard Deviation 1</i> – odchylenie standardowe 1 prostopadłe do linii identyczności
SD2	ang. <i>Standard Deviation 2</i> – odchylenie standardowe 2 wyznaczone wzdłuż linii identyczności
SEP(L)	ang. <i>Single Piston Engine (Land)</i> – uprawnienia do lotów nad lądem samolotami jednosilnikowymi
SPL	ang. <i>Glider Pilot License</i> – licencja pilota szybowcowego
SPU	stan psychoficzny ucznia
STV	ang. <i>Short Term Vairability</i> – zmienność krótkoterminowa
SWAT	ang. <i>Subjective Workload Assessment Technique</i> – technika subiektywnej oceny obciążenia
TOM	ang. <i>Take-off mass</i> – masa do startu
UACP	ang. <i>Ultralight Aeroplane Commercial Pilot</i> – świadectwo kwalifikacji pilota samolotu ultralekkiego
UAVO	ang. <i>Unmanned Aerial Vehicel Operator</i> – świadectwo kwalifikacji operatora bezzałogowego statku powietrznego używanego w celach innych niż rekreacyjne lub sportowe
ULC	Urząd Lotnictwa Cywilnego
ULM	ang. <i>Ultra Light Motorized Aerircraft</i> – samolot ultralekki
U-O	uczeń-operator
U-P	uczeń-pilot
UP	współczynnik UP
VFR	ang. <i>Visual Flight Rules</i> – przepisy dla lotów z widocznością
VLOS	ang. <i>Visual Line Of Sight</i> – lot w zasięgu wzroku

1. Wprowadzenie do tematyki rozprawy

W niniejszej rozprawie podjęta jest tematyka zwiększania efektywności szkoleń w lotnictwie, przy użyciu metody monitorowania stanu psychofizycznego kandydatów. W celu wprowadzenia w tematykę dysertacji omówiony zostanie podstawowy podział lotnictwa, system prawa w lotnictwie oraz stan bezpieczeństwa w szkoleniach lotniczych w Polsce. Każdy z przedstawionych elementów jest istotny ze względu na charakterystykę obszaru oraz umiejscowienie działań podjętych w rozprawie.

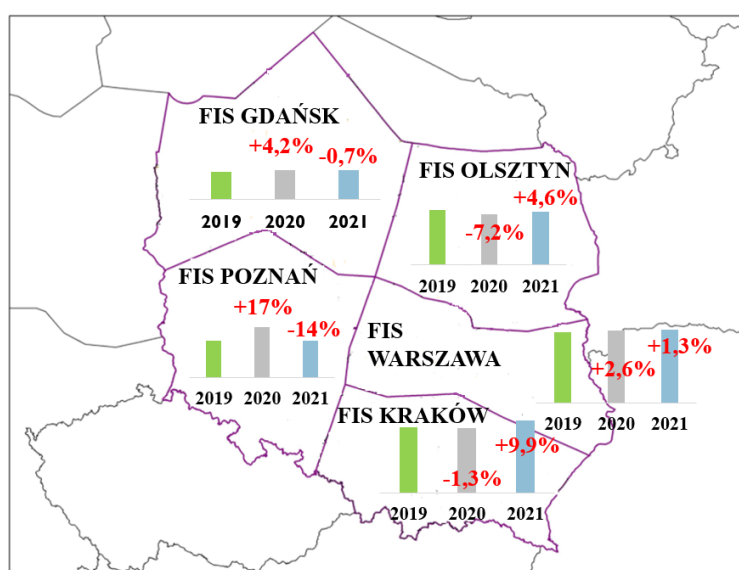
Transport lotniczy jest jedną z gałęzi transportu. Można go zdefiniować, jako wszystkie operacje lotnicze (przewóz osób i towarów drogą powietrzną) wykonywane przez użytkowników przestrzeni powietrznej przy użyciu środków transportu jakim są statki powietrzne [66, 111]. Lotnictwo jest podzielone na dwie podstawowe części: cywilne oraz państwowe (Rys. 1.1). W każdej z podstawowych części lotnictwa dodatkowo występuje lotnictwo związane z operacjami bezałogowych statków powietrznych BSP (w ang. *Unmanned Aerial Vehicle*). BSP oznacza dowolny statek powietrzny eksploatowany lub przeznaczony do eksploatacji bez pilota na pokładzie, który może działać samodzielnie lub być pilotowany zdalnie [92].



Rys. 1.1. Podstawowy podział Lotnictwa [opracowanie własne na podstawie 123]

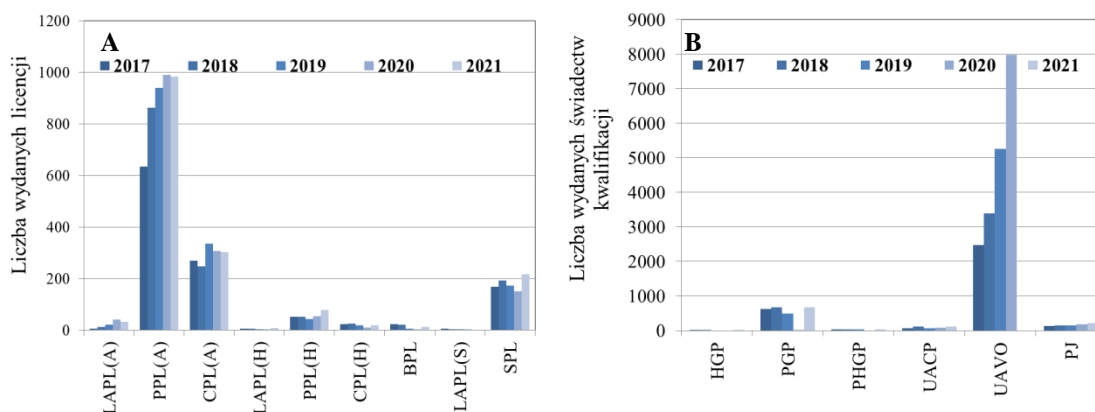
Operacje BSP, w podziale lotnictwa (Rys. 1.1) umiejscowiono jako jeden z elementów lotnictwa cywilnego oraz państwowego. Takie umiejscowienie jest motywowane faktem, iż w obu częściach lotnictwa występują operacje BSP, jednak zasady z ich korzystania są całkowicie odmienne oraz obowiązują je różne przepisy. Dodatkowo, ze względu na skomplikowany status prawny bezzałogowych statków powietrznych i ograniczenia związane z wykonywaniem lotów, brak jest informacji, jasno definiującej, w którym miejscu, w podziale lotnictwa, mogą występować BSP [23, 25, 92]. Obszar rozprawy zawężono do lotnictwa cywilnego, zatem pominięte zostanie lotnictwo państwowe, które rozumiane jest jako państwowe statki powietrzne, załogi tych statków oraz lotniska państwowe wykorzystywane wyłącznie do startów i lądowań państwowych statków powietrznych [123]. Lotnictwo cywilne można podzielić na komunikacyjne oraz ogólne. Lotnictwo komunikacyjne CAT (ang. *Commercial Air Transport*) wchodzi w skład lotnictwa cywilnego i zajmuje się regularnymi przewozami pasażerów, poczty i towarów [71]. Lotnictwo ogólne GA (ang. *General Aviation*) natomiast obejmuje cały ruch lotniczy (prywatny i komercyjny), z wyłączeniem lotów rozkładowych oraz wojskowych [71]. Transport lotniczy jest jedną z najbardziej regulowanych gałęzi transportu [31]. Prawo lotnicze reguluje stosunki należące do prawa publicznego i prywatnego, międzynarodowego i krajowego, cywilnego i wojskowego. Zawiera przepisy m.in z prawa administracyjnego, handlowego, finansowego i karnego. W prawie lotniczym występuje pewna hierarchia. Wynika ona jednak z zakresu stosowalności: dla świata, regionu czy kraju, ale nie istotności i ważności danych przepisów. Przepisy Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego ICAO (ang. *International Civil Aviation Organisation*) mają zastosowanie dla wszystkich państw należących do Organizacji, tzw. krajów członkowskich. Są to przepisy oparte na Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, podpisanej w Chicago dnia 7 grudnia 1944 r [49]. Obecnie członkami ICAO są 193 kraje. Kolejne źródło prawa stanowi Europejski system prawny, któremu podlegają kraje Unii Europejskiej razem ze Szwajcarią, Islandią oraz Norwegią [31]. Europejski system prawa lotniczego tworzą takie organizacje rządowe jak Europejska Organizacja ds. Bezpieczeństwa Żeglugi Powietrznej EUROCONTROL, Agencja Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego EASA (ang. *European Union Aviation Safety Agency*) i Europejska Konferencja Lotnictwa Cywilnego ECAC (ang. *European Civil Aviation Conference*). Kolejnym źródłem prawa w transporcie lotniczym są przepisy opracowywane na poziomie krajowym np. w Polsce Ustawa Prawo Lotnicze z lipca 2002 roku. Podsumowując system prawa lotniczego obowiązujący w Polsce, można stwierdzić, iż przepisy opracowywane przez ICAO dotyczą wszystkich krajów członkowskich, Europejski System Prawny uzupełnia i wzmacnia prawo międzynarodowe, a w Polsce stosowane są przepisy krajowe, europejskie i międzynarodowe. Omówienie funkcjonowania prawa lotniczego jest istotne ze względu na dokonaną, w ramach jednego z rozdziałów niniejszej rozprawy, charakterystykę szkoleń lotnictwa ogólnego. Wiedza merytoryczna dotycząca np. programów szkoleń lotniczych opiera się głównie na analizie źródeł prawnych na poziomie krajowym.

Tematyka rozprawy dotyczy przede wszystkim zwiększania efektywności w szkoleniach lotnictwa ogólnego w Polsce, które obejmuje lotnictwo sportowe, gospodarczo-usługowe oraz dyspozycyjne. Użytkownicy przestrzeni powietrznej, których można włączyć do tego rodzaju lotnictwa to np. turystyczne loty prywatne, loty szybowcowe oraz loty akrobacyjne. W Polsce, w ostatnich latach można zauważyć znaczny rozwój lotnictwa ogólnego. Na rysunku 1.2. przedstawiono ruch GA w poszczególnych sektorach FIS (ang. *Flight Information Services*) w latach 2019-2021. Służba FIS zajmuje się statkami powietrznymi wykonującymi operacje lotnicze od poziomu ziemi GND do FL95 (około 2900 m). FIR Warszawa (ang. *Flight Information Region*), w zakresie tych wysokości podzielony jest na pięć sektorów FIS.



Rys. 1.2. Zmiana w liczbie operacji GA w poszczególnych sektorach FIS
[opracowanie własne na podstawie 86, 87]

Analizując ruch GA pod względem największej liczby operacji, w 2019 najwięcej lotów zostało wykonanych w FIS Warszawa, w 2020 roku w FIS Poznań, natomiast w 2021 roku w FIS Kraków. Obecnie pomimo trudnego i wymagającego okresu dla lotnictwa, jakim jest przywrócenie stanu sprzed pandemii Covid-19, ruch GA jest nadal bardzo dynamiczny. Mimo zmniejszenia ruchu o 3,3%, względem 2020 r., to w porównaniu do 2019 r. ruch ten zwiększył się o 3,1% [86, 87]. Analizując ruch GA w przestrzeni powietrznej warto również zwrócić uwagę na liczbę wydawanych uprawnień lotniczych. W Polsce najwięcej wydawanych jest licencji pilota turystycznego PPL(A) (Rys. 1.3A). Liczba ta zwiększa się co roku o około 17% (Rys. 3.1A), dla licencji LAPL(A) jest to +90%, natomiast największa liczba świadectw kwalifikacji dotyczy operatora bezałogowego statku powietrznego z uprawnieniami do lotów w zasięgu wzroku (UAVO, VLOS) [111-113], która jest większa każdego roku o prawie 50% (Rys. 1.3B). Ze względu na to, iż licencja LAPL(A) jest niedawno powstałym typem upoważnienia (wprowadzona w 2017 roku) postanowiono nie uwzględniać jej w dalszych analizach.

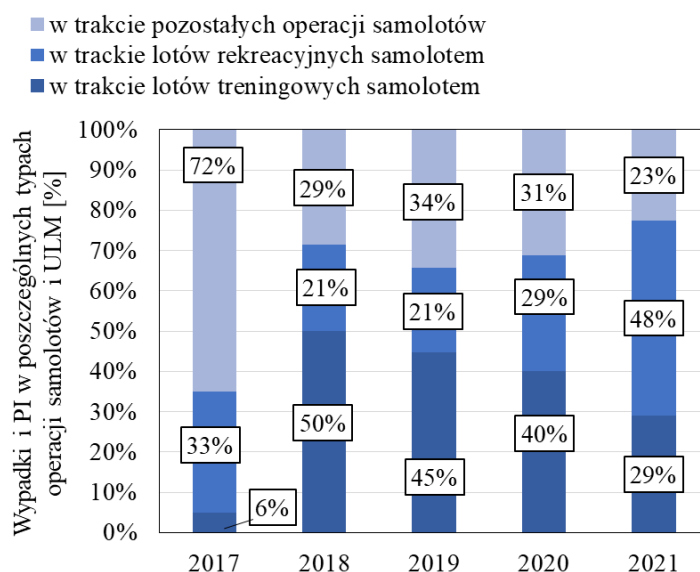


Rys. 1.3. Liczba wydanych uprawnień jako nowe A) licencje; B) świadectwa kwalifikacji [opracowanie własne na podstawie 111-113]

Na podstawie przedstawionych danych, na potrzeby rozprawy wprowadzono pojęcie szkoleń podstawowych w lotnictwie ogólnym, przez które rozumiane są wspomniane dwa uprawnienia: PPL(A) oraz UAVO, VLOS. Wybór uzasadniony jest faktem, iż są to najczęściej wydawane dokumenty w Polsce oraz szkolenia te stanowią podstawę do zwiększania kompetencji i ubiegania się o licencje zawodowe. Każdy przyszły pilot zawodowy i liniowy najpierw musi zdobyć uprawnienia PPL(A). To samo dotyczy szkolenia operatorów BSP. Dokładna charakterystyka szkoleń podstawowych w lotnictwie ogólnym zostanie przedstawiona w rozdziale 3 rozprawy.

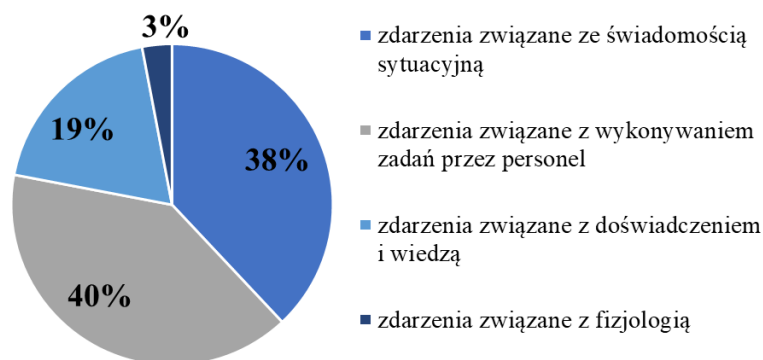
Motywacją do podjęcia tematyki, dotyczącej przebiegu szkoleń lotnictwa ogólnego oraz monitorowania stanu psychofizycznego uczniów, jest bezpieczeństwo wykonywania szkoleniowych operacji lotniczych. Zgodnie z informacjami zawartymi w rocznych sprawozdaniach ULC [114-117], dotyczących stanu bezpieczeństwa lotnictwa cywilnego, co roku około 20% wypadków i poważnych incydentów spowodowanych jest czynnikiem ludzkim. Jak przedstawiono na rysunku 1.4 w latach 2018-2021 za 70-80% wypadków i poważnych incydentów w lotach niekomercyjnych, wykonywanych samolotami odpowiadały loty szkolne oraz rekreacyjne. Udział liczby wypadków i poważnych incydentów, wśród wszystkich wypadków i poważnych incydentów w operacjach niekomercyjnych, wykonywanych samolotami, w trakcie lotów treningowych stale zmniejszał się – od 50 do 30%. Tendencja w udziale wypadków i poważnych incydentów powstałych w trakcie lotów rekreacyjnych jest odwrotna i udział tego rodzaju operacji wśród wszystkich wypadków i poważnych incydentów w lotach niekomercyjnych, wykonywanych samolotami zwiększył się w 2021 roku o 27% w porównaniu do roku 2018.

Z pośród wszystkich wypadków samolotów lotnictwa ogólnego, w operacjach niekomercyjnych, około 30% dotyczy lotów szkoleniowych (2021 rok), a kolejne 48% lotów rekreacyjnych. Liczba zgłoszonych zdarzeń lotniczych w Polsce, w trakcie lotów szkoleniowych, w 2020 roku wyniosła odpowiednio 175 w lotach z instruktorem oraz 124 w lotach samodzielnych. W 2021 roku można było zaobserwować niewielkie zmniejszenie tej liczby, jedynie w zakresie lotów z instruktorem, które równało się liczbie 149 zgłoszeń, natomiast dla operacji samodzielnych liczba ta pozostała bez znaczących zmian (125 zgłoszeń).



Rys. 1.4. Udział W i PI poszczególnych typów operacji wśród wszystkich W i PI powstałych w trakcie lotów samolotami oraz ULM [opracowanie własne na podstawie 46-48, 114-121]

Dodatkowo w ciągu ostatnich dwóch lat można zaobserwować, że eksperci z branży lotniczej coraz częściej zwracają uwagę na problemy pojawiające się w ośrodkach szkoleniowych [46-48]. Dotyczą one przede wszystkim braku zgłaszania wszystkich zdarzeń lotniczych, mających miejsce w lotach szkolnych oraz stale zwiększającej się, w ostatnich latach, liczbie wspomnianych zdarzeń w trakcie lotów instruktorskich. Zgodnie z danymi ULC, wypadki samolotów w lotnictwie ogólnym, których przyczyną jest czynnik ludzki można podzielić na 4 kategorie przedstawione na rysunku 1.5.



Rys. 1.5. Udział poszczególnych kategorii czynnika ludzkiego w powstawaniu wypadków w operacjach GA [opracowanie własne na podstawie 114-121]

Ze względu na liczbę zdarzeń, występujących w trakcie lotów szkoleniowych oraz rozwój ruchu GA w pracy postanowiono skupić się na zwiększaniu efektywności szkoleń lotniczych. W ramach niniejszej rozprawy poprzez efektywność rozumiane jest jej zwiększanie w aspekcie bezpieczeństwa i ograniczenia występowania zdarzeń lotniczych w lotach szkoleniowych oraz rekreacyjnych.

Analizując działania podejmowane przez podmioty administracyjne zajmujące się bezpieczeństwem w Polsce oraz środowisko naukowe możliwe jest wyróżnienie trzech obszarów działania w zakresie zwiększania efektywności szkoleń: monitorowanie

Certyfikowanych Ośrodków Szkoleniowych ATO (ang. *Approved Training Organisation*), wprowadzanie dodatkowych szkoleń, dotyczących zwiększania wiedzy w zakresie świadomości sytuacyjnej pilotów oraz monitorowanie i ocena stanu psychofizycznego kandydatów [2, 12, 46-48, 51, 64-66, 101].

W ramach pierwszego z obszarów wskazać można działania Inspektoratu Certyfikacji i Nadzoru Departamentu Personelu Lotniczego, będącego jednostką Urzędu Lotnictwa Cywilnego [46-48]. Według przekazywanych na corocznych Konferencjach Bezpieczeństwa informacji, audyty przeprowadzane przez wspomnianą jednostkę wykazały następujące problemy w organizacjach ATO: realizacja szkolenia w oparciu o minima godzinowe zawarte w regulacjach prawnych – brak rozszerzenia liczby godzin szkolenia, jeśli to konieczne, częste zmiany instruktorów w trakcie szkoleń oraz brak szkoleń oraz kursów standaryzacyjnych dla instruktorów [48]. Na podstawie zawartych informacji wspomniany Inspektorat proponuje rozwiązania oparte na monitorowaniu w organizacji ATO zdarzeń lotniczych związanych z lotami z instruktorem na pokładzie oraz lotami samodzielnymi uczniów-pilotów, odbywającymi się pod nadzorem instruktorów. Takie predyktywne działanie, przez które rozumiane jest prawidłowe szkolenie oraz kontrola ma wpłynąć na identyfikowanie i eliminowanie przyczyn zdarzeń niepożądanych, jeszcze zanim rozpocznie się tworzenie ciągu zdarzeń, prowadzącego do powstania wypadku lotniczego. Zakłada się, że takie podejście zwiększy świadomość osób zarządzających ATO w zakresie bezpieczeństwa w trakcie szkolenia lotniczego oraz doprowadzi do zwiększenia poziomu jakości szkoleń [48].

Kolejnym omawianym obszarem są działania dotyczące zwiększania wiedzy na temat świadomości sytuacyjnej pilotów SA (ang. *situational awareness*). SA jest to zdolność operatora statku powietrznego do zgromadzenia informacji, warunkujących stworzenie rzeczywistego obrazu statku powietrznego w dynamicznie zmieniającym się środowisku zadaniowym, na określonym etapie realizacji zadania lotniczego oraz określenia przewidywanych zmian w perspektywie czasowej [51]. Świadomość sytuacyjna definiowana jest na trzech poziomach: odbiór informacji zewnętrznej w kontekście czasu i przestrzeni (I), zrozumienie znaczenia tej informacji (II) oraz przewidywanie, jak ta informacja wpłynie w bliskiej przyszłości na otoczenie pilota (III). Najwięcej błędów (80%) jest popełnianych przez pilota na pierwszym etapie procesu świadomości sytuacyjnej. Działania proponowane w ramach tego obszaru dotyczą opracowania i wprowadzenia szkolenia dla pilotów oraz osób zarządzających ATO z zakresu SA [51]. Wskazano kilka barier SA, które mogą doprowadzić do wystąpienia niepożądanego zdarzenia lotniczego, a wprowadzenie szkolenia również dla osób odpowiedzialnych w organizacjach ATO może stanowić pierwszą zaporę w łańcuchu powstawania zdarzenia niepożądanego [51].

Trzecim wskazanym obszarem działania zwiększającym efektywność szkoleń lotniczych w aspekcie bezpieczeństwa jest monitorowanie i ocena stanu psychofizycznego uczniów. Pojęcie stanu psychofizycznego wywodzi się z nauki, jaką jest psychofizyka, która zajmuje się relacjami zachodzącymi pomiędzy właściwościami bodźców działających na organizm człowieka, a wrażeniami psychicznymi i fizjologicznymi. W aspekcie monitorowania stanu psychofizycznego ucznia-

pilota/pilota można wskazać działania prowadzone głównie przez środowisko naukowe i dotyczą, przede wszystkim, poprawy precyzji pilotażu podczas szkolenia lotniczego oraz eliminacji wpływu wewnętrznych i zewnętrznych czynników, negatywnie oddziałujących na pilotów. Badania te realizowane są w różnych ośrodkach na świecie i prowadzone głównie w warunkach symulatorowych [2, 12, 64-66, 103]. W jednych z badań, prowadzonych na Harvardzie dokonano analizy zmienności rytmu serca u pilotów liniowych. Środowisko operacji lotniczych odwzorowano przy użyciu symulatora lotów [12]. Zbadano 30 doświadczonych pilotów. Opracowano liniowy model, który oceniał wpływ wieku, masy ciała, doświadczenia lotniczego na symulatorach oraz trudności zadania na uzyskane przez pilotów parametry HRV. Niższe HRV związane było z wiekiem, masą ciała oraz trudnością zadania. Większe wartości parametrów HRV (równowaga AUN) były związane z większym prawdopodobieństwem prawidłowego wykonania manewru [12]. Kolejnym przykładem są badania, realizowane na Uniwersytecie Kore [2]. W badaniach dokonano analizy zależności obciążenia zadaniowego określonego formularzem NASA TLX i parametrów HRV osiągniętych przez pilotów. Badania dotyczyły 20 pilotów o dużym doświadczeniu lotniczym. Wykonywano loty przy użyciu symulatora. Wykazano zależność, że im większe obciążenie zadaniem (NASA TLX) tym niższe wartości parametrów analizy czasowej HRV. W podsumowaniu autorzy stwierdzają, że uzyskane wyniki mogą doprowadzić do opracowania algorytmu mierzącego obciążenie zadaniowe w trakcie wykonywanych lotów [2]. Jednym z niewielu przykładów badań nad stanem psychofizycznym, realizowanych w warunkach rzeczywistych są badania prowadzone na Czeskim Uniwersytecie Technicznym w Pradze [103]. Jedne z badań dotyczyły obciążenia zadaniowego pilotów w trakcie szkolenia i przejścia z analogowego kokpitu na glass kokpit. Przebadano 20 osób w lotach rzeczywistych. Wykazano, że zmiana rodzaju kokpitu nie jest czynnikiem stresującym, jednak znacząco wpływa na efektywność i wydajność pilota. Na podstawie analiz zalecono, że przy zmianie kokpitów powinno odbywać się szkolenie na symulatorze około 4-5 godzinne [103].

Na podstawie analiz stanu bezpieczeństwa w obszarze szkoleń lotnictwa ogólnego oraz działań dotyczących ograniczania liczby zdarzeń występujących w trakcie ćwiczeń szkoleniowych, które są proponowane przez polskie jednostki administracyjne oraz światowe środowisko naukowe. W pracy postanowiono wykonać badania w warunkach rzeczywistych, których wyniki umożliwiają opracowanie metody, pozwalającej na monitorowanie stanu psychofizycznego kandydata w trakcie zadań szkoleniowych. Zaproponowano również system oceniania, dedykowany dla Ośrodków Szkolenia Lotniczego ATO, stosowany celem zwiększania efektywności szkoleń podstawowych w lotnictwie ogólnym.

2. Problemy badawcze oraz cel i zakres pracy

2.1. Problemy badawcze

Lotnictwo staje się coraz bardziej popularną gałęzią transportu. Każdego roku liczba wydawanych licencji dla pilotów oraz świadectw dla operatorów zwiększa się. Znaczny przyrost w liczbie wydawanych licencji następuje w przypadku licencji pilota turystycznego (zwiększenie liczby wydawanych licencji o około 17%), pilota rekreacyjnego (40%) oraz świadectw kwalifikacji UAVO (55%). Wszystkie powyższe są ściśle związane z lotnictwem ogólnym, należącym do lotnictwa cywilnego oraz są licencjami, które każdy przyszły pilot zawodowy oraz liniowy realizuje na początku swojej kariery lotniczej. W 2021 roku, w porównaniu do roku 2020 liczba wydanych licencji pilota turystycznego zmniejszyła się o 6%, natomiast liczba wydanych świadectw kalifikacji operatora bezzałogowego statku powietrznego zwiększyła się o 55%. Znaczny rozwój można zauważyć również w liczbie operacji GA. Zgodnie z danymi zawartymi w raportach Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej (PAŻP) w roku 2020 w porównaniu do roku 2019 liczba operacji GA zwiększyła się o 6,6%, natomiast w 2021 w porównaniu do 2019 roku zmniejszyła o 3,3%. Razem z liczbą wydanych licencji oraz rozwojem ruchu General Aviation zwiększa się również liczba zdarzeń w lotnictwie. W 2021 roku liczba wypadków i poważnych incydentów wyniosła 111, z czego 58 dotyczyło lotnictwa ogólnego. Stanowi to, aż 48% wszystkich wypadków i poważnych incydentów lotniczych w Polsce. W roku 2020 liczba ta wyniosła odpowiednio 136 wypadków i poważnych incydentów, a 43% z nich wystąpiło w trakcie operacji GA. W latach 2017-2018 około 70% wypadków i poważnych incydentów wystąpiło w trakcie opracji lotnictwa ogólnego. Dodatkowo w 2018 roku można było zaobserwować 4,5 razy więcej zdarzeń lotniczych w operacjach bezzałogowych statków powietrznych niż w 2017 roku i 30% więcej w 2019 roku, w porównaniu do roku 2018. W latach 2020 i 2021 liczba zdarzeń zwiększyła się kolejno o 8 i 14%. Bezpieczeństwo lotów jest istotną kwestią w systemie transportu lotniczego [45]. Na podstawie analizy transportu lotniczego pod względem liczby wypadków i przyczyn ich występowania oraz liczby wydanych licencji i świadectw kwalifikacji. Stwierdzono, że w celu rozwiązania obecnej sytuacji uwagę należy zwrócić na przebieg szkoleń lotniczych oraz egzaminów licencyjnych. Według raportu Stowarzyszenia Właścicieli i Pilotów Samolotów AOPA (ang. *The Aircraft Owners and Pilots Association*) w 2022 roku, z pośród wszystkich wypadków lotniczych na świecie 73,9% dotyczyło operacji niekomercyjnych i około 13% miało miejsce w trakcie wykonywania lotów przez osoby posiadające licencję PPL(A) [11, 132]. Zgodnie z Programem szkolenia do licencji pilota turystycznego opracowanym przez Aeroklub Polski, (zwanym dalej „Programem Szkolenia”), część praktyczna szkolenia obejmuje, zgodnie z obowiązującymi przepisami, około 45 h, z czego jedynie około 8 h przewidziane jest na samodzielne loty (w przypadku lotów nocnych jest to jedynie 30 min). Należy również zastanowić się od czego zależy liczba godzin szkolenia praktycznego zrealizowana danego dnia oraz decyzja, czy dany kandydat do licencji pilota jest przygotowany do samodzielnych lotów. Analizując ten sam Program

Szkolenia można znaleźć informację, iż to instruktor szkolący określa dzienną liczbę i czas wykonywania lotów szkolnych uwzględniając predyspozycje i samopoczucie ucznia [1]. Oznacza to, że instruktor kieruje się w trakcie szkolenia lotniczego jedynie swoimi subiektywnymi odczuciami względem stanu psychofizycznego ucznia, co nie stanowi rzetelnej oceny predyspozycji do wykonania operacji lotniczej załogowym lub bezzałogowym statkiem powietrznym.

W celu stwierdzenia, czy predyspozycje i stan psychofizyczny kandydata są odpowiednie do przeprowadzenia operacji lotniczej wskazana jest analiza możliwości wykorzystania metod obiektywnych lub opartych na analizach behawioralnych do oceny ucznia. W związku z powyższym w rozprawie doktorskiej głównym problemem badawczym jest podjęcie próby obiektywizacji oraz sformułowanie zaleceń dotyczących oceny stanu psychofizycznego kandydatów w trakcie szkolenia lotniczego.

Rozprawa dotyczy możliwości obiektywnej oceny stanu psychofizycznego kandydata. Dobrano odpowiednie i nieinwazyjne metody badawcze oraz opracowano metodę pozwalającą instruktorowi na obiektywne sprawdzenie umiejętności ucznia w czasie wykonywania danej operacji lotniczej. Działania umożliwią wskazanie słabych punktów i dostosowanie programu szkolenia do potrzeb przyszłego pilota/operatora. Metoda ta w przyszłości będzie stosowana przez Ośrodki Szkolenia Lotniczego ATO (ang. *Aviation Training Organisation*), celem efektywniejszego wyznaczania zadań problematycznych w programie szkolenia i redukcji pojawiających się błędów.

2.2. Cel i zakres pracy

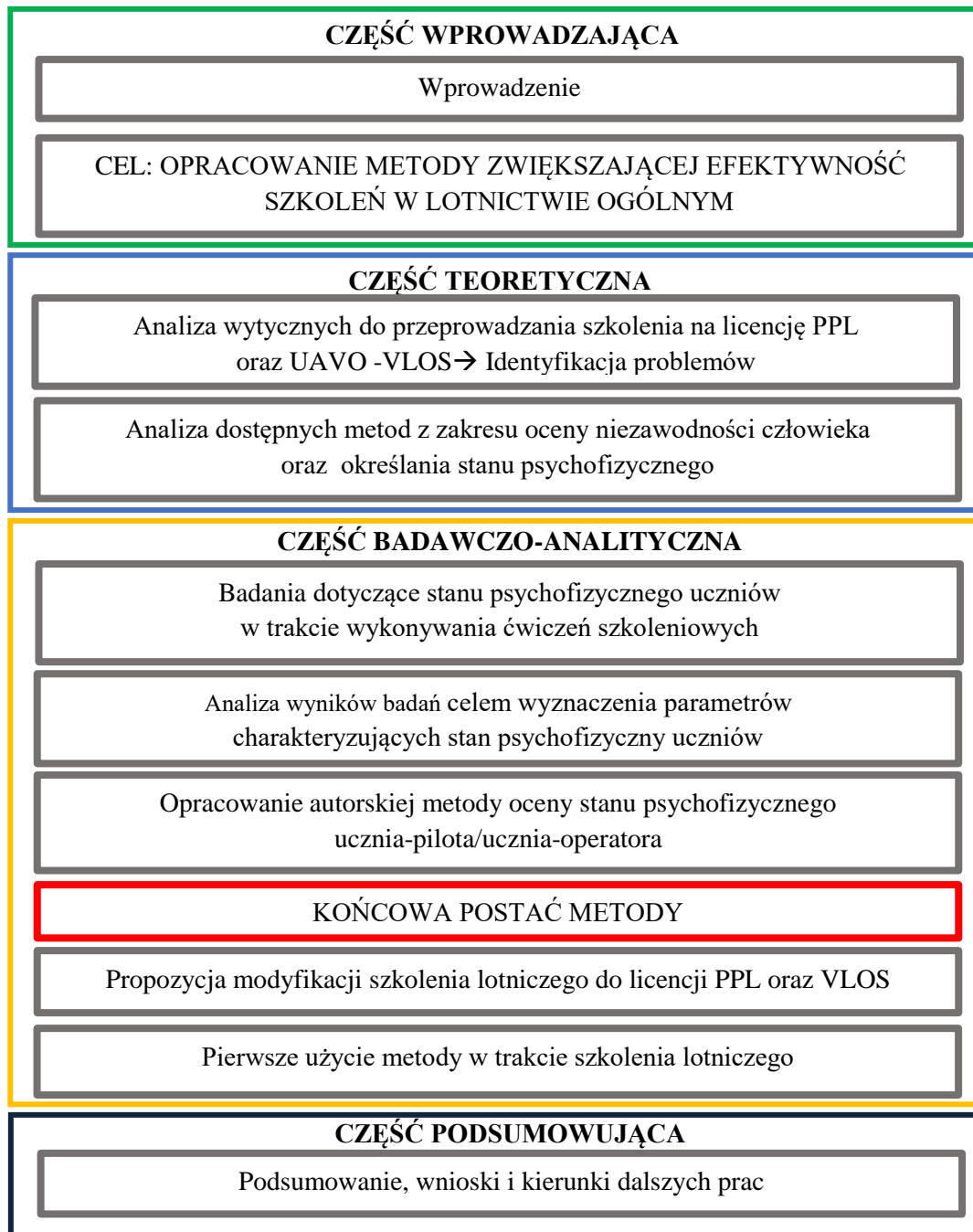
Praca jest próbą rozwiązania problemu badawczego, jakim jest obiektywizacja oceny przygotowania ucznia-pilota oraz ucznia-operatora w lotnictwie ogólnym do wykonywania samodzielnych lotów. Na podstawie określonego problemu badawczego sformułowano cel pracy: opracowanie metody pozwalającej na zwiększenie efektywności podstawowych szkoleń lotniczych za pomocą obiektywnych kryteriów oceny stanu psychofizycznego ucznia-pilota/ucznia-operatora.

Dążąc do osiągnięcia celu pracy podjęto następujące zadania badawcze:

1. Analiza procesu licencjonowania pilotów oraz operatorów w lotnictwie ogólnym ze szczególnym uwzględnieniem licencji pilota turystycznego oraz świadectwa kwalifikacji operatora bezzałogowych statków powietrznych.
2. Analiza dostępnych metod z zakresu oceny niezawodności człowieka oraz monitorowania stanu psychofizycznego człowieka.
3. Przeprowadzenie badań na uczniach-pilotach oraz uczniach-operatorach, celem zebrania danych, dotyczących stanu psychofizycznego osób szkolonych w trakcie wykonywania zadań szkoleniowych.
4. Analiza uzyskanych wyników badań, celem wyznaczenia parametrów charakteryzujących stan psychofizyczny uczniów.
5. Opracowanie metodyki oraz koncepcji badawczej zastosowanej w metodzie.
6. Opracowanie autorskiej metody pozwalającej na zwiększenie efektywności podstawowych szkoleń lotniczych.
7. Pierwsze użycie metody w trakcie szkolenia lotniczego.

Rozprawa została podzielona na 4 części (Rys. 2.1.):

- część wprowadzającą – rozdział 1 i 2,
- część teoretyczną – rozdział 3 i 4,
- część badawczo-analityczną – rozdział 5 i 6,
- część podsumowującą – rozdział 7



Rys. 2.1. Struktura rozprawy

3. Charakterystyka szkoleń w lotnictwie ogólnym

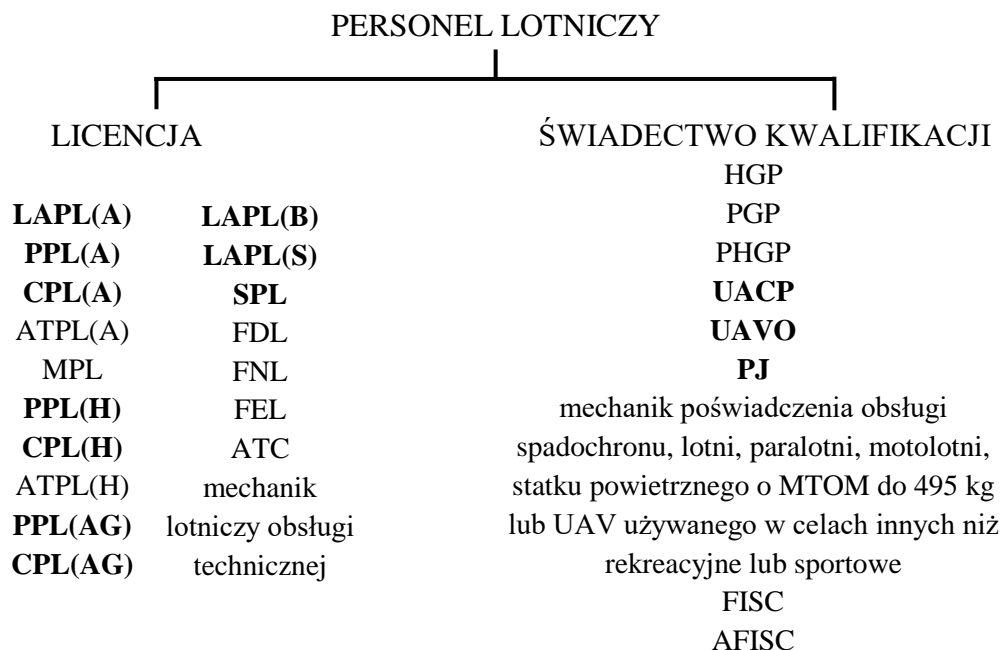
3.1. Licencjonowanie pilotów w wybranych obszarach szkoleń lotniczych

Lotnictwo ogólne, które jest częścią lotnictwa cywilnego, zgodnie z definicją Ministerstwa Infrastruktury to cały ruch lotniczy (prywatny i komercyjny) z wyłączeniem lotów rozkładowych oraz wojskowych [71]. W lotnictwie, aby zostać uprawnionym do wykonywania czynności lotniczych trzeba być członkiem personelu pokładowego, członkiem personelu lotniczego, osobą uczestniczącą w szkoleniu lotniczym lub zajęciach rekreacyjnych na lotniach i paralotniach [123]. W celu uzyskania uprawnień należy ubiegać się o posiadanie licencji lub świadectw kwalifikacji, zależnych od typu i klasy statku powietrznego, na którym dany kandydat chce wykonywać czynności lotnicze. Źródła prawne regulujące licencjonowanie personelu lotniczego są następujące:

- Załącznik 1 do Konwencji Chicagowskiej z 1944 roku – Licencjonowanie Personelu Lotniczego [79],
- Rozporządzenie (EU) 1178/2011 z 3 listopada 2011, zawierające 7 załączników, dotyczących: wymagań dla członków załogi lotniczej, warunków konwersji krajowych licencji oraz uprawnień na samoloty i śmigłowce, warunków uznawania licencji wydanych przez państwa trzecie lub w ich imieniu, wymagań medycznych, wymagań dla personelu pokładowego, wymagań dla władz oraz wymagań dla organizacji szkoleniowych, operatorów FSTD i ośrodków medycznych,
- Rozporządzenie (EU) 2018/395 z dnia 13 marca 2018 roku – Balony: Operacje i Licencjonowanie personelu lotniczego,
- Rozporządzenie (EU) 2018/1976 z dnia 14 grudnia 2018 roku – Szybowce: Operacje i Licencjonowanie personelu lotniczego,
- Rozporządzenie (EU) numer 1321/2014 – PART 66 – Licencjonowanie personelu obsługującego statki powietrzne,
- Ustawa Prawo Lotnicze z dnia 3 lipca 2002 roku – Dział V.

Podstawowym źródłem informacji dotyczącym licencjonowania personelu lotniczego w Polsce jest Ustawa Prawo Lotnicze oraz dokumenty wydawane przez Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego. Polska, jako członek ICAO oraz Unii Europejskiej ma obowiązek stosować się do międzynarodowych oraz europejskich wytycznych. Na tej podstawie tworzy własne regulacje, które nie mogą być sprzeczne z postanowieniami ICAO oraz UE. Zgodnie z definicją Licencji zawartą w Ustawie [123] jest to świadectwo stwierdzające posiadanie określonych kwalifikacji oraz dowód upoważnienia do wykonywania określonych czynności lotniczych. Licencja wydawana jest przez Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego [81]. Świadectwem kwalifikacji jest dokument stwierdzający posiadanie określonych kwalifikacji i upoważniający do wykonywania określonych czynności lotniczych [81].

Zarówno licencja, jak i świadectwo kwalifikacji wydawane są w ramach uzyskania upoważnienia do różnych czynności lotniczych. Spis licencji oraz świadectw kwalifikacji, o które można się ubiegać zgodnie z Ustawą Prawo Lotnicze, będący również zgodny z Załącznikiem 1 do Konwencji Chicagowskiej przedstawiono na rysunku 3.1.

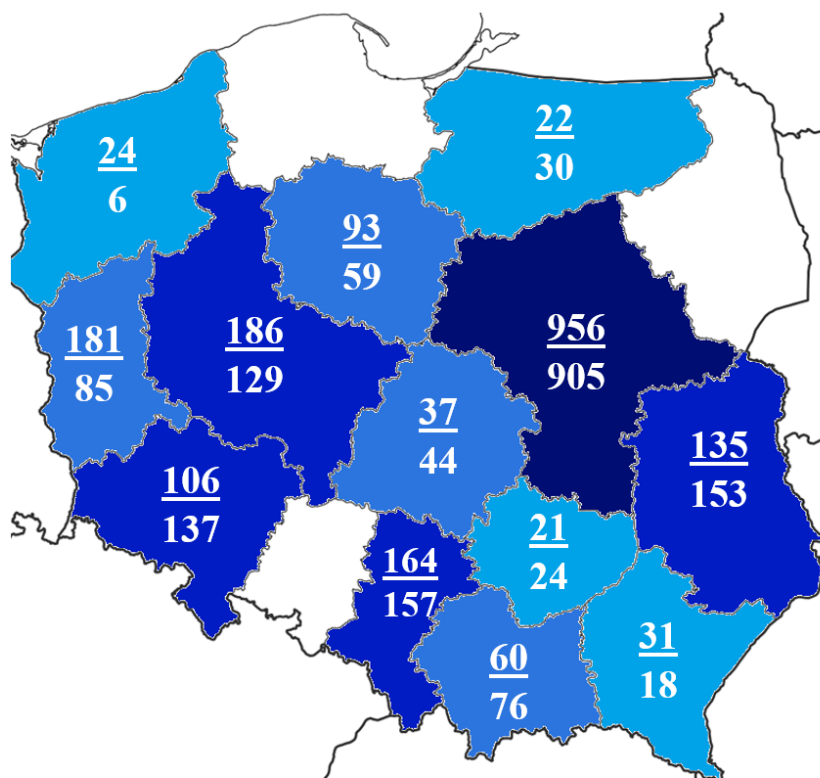


Rys. 3.1. Licencje i świadectwa kwalifikacji [opracowanie własne na podstawie 123]

Ze względu na specyfikę rozprawy w dalszych rozważaniach związanych z uzyskiwaniem licencji oraz świadectw kwalifikacji wzięto pod uwagę: licencję pilota zawodowego (CPL), licencję pilota turystycznego (PPL), licencję pilota rekreacyjnego (LAPL) i licencję pilota szybowcowego (SPL) oraz świadectwa kwalifikacji: pilota statku powietrznego o masie MTOM nie przekraczającej 495 kg (UACP), skoczka spadochronowego (PJ) oraz operatora bezzałogowego statku powietrznego (UAVO) (pogrubione na schemacie 3.1). Pominięto licencję pilota liniowego (ATPL) i pilota w załodze wieloosobowej (MPL), które są licencjami dedykowanymi dla lotnictwa komercyjnego oraz członków personelu naziemnego tj. mechaników lotniczych, służby kontroli ruchu lotniczego (ATC), służby informacji powietrznej (FISC, AFISC), dyspozytorów lotniczych (FDL, FEL, FNL). W celu rozpoczęcia szkolenia do licencji lub świadectwa kwalifikacji przyszły uczeń musi mieć określone wskazania. Dotyczą one przede wszystkim wieku i stanu zdrowia ucznia-pilota lub ucznia-operatora. W aspekcie uzyskiwania świadectwa kwalifikacji uprawnienia te można podzielić na 3 kategorie wiekowe: 15 lat, 16 lat oraz 18 lat. Do 16 roku życia można uzyskać świadectwo kwalifikacji do pilotowania statkiem powietrznym o masie MTOM nie przekraczającej 495 kg oraz skoczka spadochronowego. Po ukończeniu 18 roku życia można ubiegać się o świadectwo kwalifikacji operatora BSP wykorzystywane w celach innych niż rekreacyjne i sportowe. W ramach uzyskania licencji kategorie wiekowe, według których, można podzielić uprawnienia to 16, 17, 18 i 21 lat. Jeżeli uczeń-pilot chce uzyskać licencję pilota szybowcowego lub balonowego musi mieć ukończone

16 lat. W przypadku wykonywania czynności lotniczych na potrzeby zawodowe, do omawianych licencji należy mieć ukończone 18 lat. W celu ubiegania się o licencję pilota rekreacyjnego samolotowego (oznaczane literą A od słowa *aircraft*) lub śmigłowcowego (oznaczane literą H od słowa *helicopter*) kandydat musi mieć ukończone 17 lat. Do tej kategorii wiekowej należy również licencja pilota turystycznego (PPL). Pilotem z licencją zawodową, bez względu na kategorię statku powietrznego może zostać osoba, która ukończyła 18 rok życia.

Szkolenia lotnicze są przeprowadzane zgodnie z zasadami przedstawionymi w regulacjach wymienionych na początku rozdziału. Prawidłowo zrealizowane szkolenie musi spełniać szereg wymagań. Do tych najważniejszych należy zaliczyć odbycie szkolenia w ośrodku kształcenia lotniczego ATO (ang. *Approved Training Organisation*). Na stronie Urzędu Lotnictwa Cywilnego znajduje się aktualny wykaz certyfikowanych ośrodków szkolenia lotniczego. Są tam zawarte wszystkie ośrodki spełniające wymagania certyfikacji stawiane przez obowiązujące przepisy prawa lotniczego. Obecnie, w Polsce funkcjonuje około 80 takich ośrodków, a w 60 z nich możliwe jest zrealizowanie szkolenia PPL(A). Ośrodki ATO znajdują się na terenie 13 polskich województw, a szkolenia do licencji PPL(A) nie są realizowane w województwie pomorskim, podlaskim oraz opolskim. Na rysunku 3.2 przedstawiono liczbę uczniów-pilotów w poszczególnych województwach w 2021 oraz 2022 roku. Dane pochodzą z Inspektoratu Nadzoru i Certyfikacji, Departamentu Licencjonowania Personelu Lotniczego, który jest jednostką funkcjonującą w Urzędzie Lotnictwa Cywilnego i zostały udostępnione na rzecz niniejszej rozprawy.



Rys. 3.2. Liczba uczniów-pilotów w poszczególnych województwach w 2021 (górną część) oraz 2022 (dolną część) roku [opracowanie własne na podstawie danych z ULC]

W roku 2021 oraz 2022 w Polsce szkolenie odbywało około 2000 uczniów-pilotów, co oznacza, że 50% uczniów realizuje programy szkolenia w województwie mazowieckim (jest to również województwo z największą liczbą ośrodków ATO, w której można ubiegać się o licencję PPL(A)), około 32% w województwach wielkopolskim, dolnośląskim oraz śląskim. W pozostałych województwach program szkolenia odbywa około 28% uczniów. W celu porównania sytuacji w ośrodkach ATO w Polsce, wprowadzono pojęcie współczynnika U-P (UP), który jest ilorazem liczby uczniów-pilotów i ośrodków ATO w danym województwie i obliczany zgodnie ze wzorem (1):

$$UP = \frac{\text{liczba uczniów-pilotów}}{\text{liczba ośrodków ATO w województwie}} \quad (1)$$

Dokonano stosownych obliczeń, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Współczynnik UP w poszczególnych województwach w 2021 oraz 2022 roku.

Lp.	Województwo	UP 2021	UP 2022	liczba ośrodków	zmiana
1	Dolnośląskie	18	23	6	↑
2	Kujawsko-pomorskie	19	12	5	↓
3	Lubelskie	23	26	6	↑
4	Lubuskie	181	85	1	↓
5	Łódzkie	12	15	3	↑
6	Małopolskie	20	25	3	↑
7	Mazowieckie	64	60	15	↓
8	Podkarpackie	31	18	1	↓
9	Śląskie	21	20	8	↓
10	Świętokrzyskie	21	24	1	↑
11	Warmińsko-mazurskie	11	15	2	↑
12	Wielkopolskie	31	22	6	↓
13	Zachodniopomorskie	24	6	1	↓

W 2021 roku status ucznia-pilota posiadało 2016 osób, natomiast 2022 roku 1823. Oznacza to, że w Polsce, w 2022 roku szkolono o 10% mniej kandydatów niż w roku 2021. W 6 województwach nastąpiło zwiększenie liczby uczniów, natomiast w 7 zmniejszenie. Najmniejsza zmiana występuje w województwie śląskim, łódzkim, świętokrzyskim oraz lubelskim, natomiast największa zmiana dotyczy województwa lubuskiego, zachodniopomorskiego, pokarpackiego i wielkopolskiego. Znaczące zmiany dotyczą trendu ujemnego. Jak można zauważyć największy współczynnik U-P występuje w województwie lubuskim. W 2021 roku wynosił 181, natomiast w 2022 roku 85. Przyjmując następujące założenia dla jednego ośrodka szkoleniowego:

- wykonywanie lotów szkolnych od 1 marca do 30 listopada każdego roku,
- wykonywanie lotów szkoleniowych od godziny 5:00 do 19:00,
- realizowanie przez każdego ucznia-pilota 45 h lotów szkolnych,
- przyjmowanie 60% dni z odpowiednimi warunkami atmosferycznymi do lotów od 1 marca do 30 listopada,
- posiadanie przez jeden ośrodek ATO 5 samolotów szkoleniowych,
- zatrudnienie w ATO trzech instruktorów szkolenia lotniczego,

obliczono, że możliwe jest wykonanie pełnego programu praktycznego szkolenia lotniczego do licencji PPL(A) dla około 142 uczniów-pilotów. Przedstawione obliczenia oparte są na wartościach charakterystycznych dla większych ośrodków szkoleniowych oraz przyjęte zostały w sposób znacznie zawyżony. Przy założeniu, że jeden ośrodek szkoleniowy zatrudnia jednego instruktora i posiada jeden samolot, realizacja szkolenia jest możliwa jedynie przez maksymalnie 47 uczniów. Obliczenia służą porównaniu wartości współczynnika U-P do faktycznych, możliwych do zrealizowania szkoleń. Analizując uzyskane wyniki (Tab. 3.1) należy zwrócić uwagę na liczbę szkolonych osób w województwie lubuskim. Stosując przedstawione założenia, które zostały przyjęte w zawyżonych wartościach, aby móc przeprowadzić szkolenie praktyczne takiej liczby uczniów, konieczne we wspomnianym ośrodku byłoby zatrudnienie 5 instruktorów, wykonujących ćwiczenia szkoleniowe z uczniem lub nadzór nad lotami we wszystkie możliwe dni, a loty wykonywane byłyby jednocześnie 5 samolotami szkoleniowymi, przez 12 godzin dziennie. Na podstawie przedstawionych rozważań należy zastanowić się nad procesem realizacji oraz efektywnością szkolenia tylu uczniów-pilotów. Jak można zauważyć w kolejnym roku, w województwie lubuskim liczba szkolonych uczniów-pilotów, przypadająca na jeden ośrodek ATO zmniejszyła się do 85, co stanowi oczekiwany trend.

Elementem prawidłowego przebiegu szkolenia lotniczego jest także zrealizowanie odpowiedniej liczby godzin zajęć teoretycznych oraz praktycznych. Obie części szkolenia podlegają egzaminowi końcowemu, który uprawnia do posiadania licencji oraz świadectwa kwalifikacji. Program szkolenia musi być zgodny z przepisami EASA, a dokładniej z Załącznikiem 1 do rozporządzenia (EU) numer 1178/2011 – Część FCL (ang. *Flight Crew Licencing*), mówiącym o wymaganiach dotyczących członków załogi lotniczej. W Rozporządzeniu zawarte są minima dotyczące programów szkoleń lotniczych na poszczególne typy i kategorie statków powietrznych. W omawianych źródłach prawa przedstawione są wymagane liczby godzin nalotów, liczby godzin zajęć teoretycznych oraz omówione ewentualne wykorzystanie Szkoleniowych Urządzeń Symulacji Lotu FSTD (ang. *Flight Simulation Training Device*) w programie szkolenia praktycznego.

W celu rozpoczęcia szkolenia lotniczego i ubiegania się o zdobycie upoważnień przed przystąpieniem do czynności lotniczych należy zdobyć orzeczenie lekarskie. Orzeczenie wydawane jest na podstawie badania lotniczo-lekarskiego, podczas którego sprawdza się sprawność psychiczną i fizyczną kandydatów na członków personelu lotniczego oraz kontroluje personel lotniczy, posiadający uprawnienia [123]. Badania lotniczo-lekarskie są przeprowadzane odpłatnie, tylko przez określone podmioty. Należą do nich: centra medycyny lotniczej oraz lekarze orzecznicy medycyny lotniczej. W Polsce znajdują się trzy centra medycyny lotniczej, a ich aktualna lista znajduje się na stronie internetowej Urzędu Lotnictwa Cywilnego [34]. Orzeczenie lekarskie występuje w trzech klasach: 1, 2 oraz 3. Orzeczenie lekarskie 1. klasy zawiera przywileje i terminy ważności przewidziane dla orzeczenia lekarskiego na potrzeby licencji CPL oraz ATPL. Orzeczenie lekarskie 2. klasy zawiera przywileje i terminy ważności przewidziane dla orzeczenia lekarskiego na potrzeby LAPL [93], natomiast orzeczenie lekarskie 3. klasy przeznaczone jest dla kandydatów na kontrolerów ruchu

lotniczego ATC. Orzeczenie lekarskie 1. klasy wydaje centrum medycyny lotniczej, natomiast orzeczenie lekarskie 2. klasy może wydać centrum medycyny lotniczej lub lekarz orzecznik medycyny lotniczej. Klasa orzeczenia lekarskiego ma wpływ przede wszystkim na okres jego ważności oraz określone wymagania zdrowotne. Okresy trwania poszczególnych klas orzeczeń lekarskich przedstawiono w tabeli 3.2. Do orzeczenia lekarskiego może zostać wpisane każde ograniczenie, jeżeli wymaga tego bezpieczeństwo lotu. Załącznik IV do Rozporządzenia [93] szczegółowo określa wymagania zdrowotne w odniesieniu do orzeczeń lekarskich klasy 1 i 2.

Tabela 3.2. Ważność orzeczenia lekarskiego [opracowanie własne na podstawie 24, 93]

Klasa	Ważność orzeczenia lekarskiego		
1	12 miesięcy	6 miesięcy, dla posiadaczy licencji, którzy: – wykonują przewozy lotnicze zarobkowe pasażerów w załodze jednoosobowej i mają powyżej 40 lat, – osiągnęli wiek 60 lat.	
2	60 miesięcy do 40 roku życia,	24 miesiące dla wieku od 40 do 50 lat	12 miesięcy do 50 roku życia

Zgodnie z Ustawą Prawo Lotnicze oraz Rozporządzeniami Ministerstwa Infrastruktury badaniom lotniczo-lekarskim nie podlegają następujący członkowie personelu lotniczego oraz kandydaci na członków personelu lotniczego [71, 123]: pilot lotni, pilot paralotni, pilot motolotni, skoczek spadochronowy, mechanik poświadczenia obsługi statków powietrznych, mechanik lotniczy obsługi technicznej, operator bezzałogowego statku powietrznego o masie startowej do 5 kg używany wyłącznie w operacjach w zasięgu widoczności wzrokowej w celach innych niż rekreacyjne i sportowe.

W związku z obowiązującymi regulacjami i aspektem rozprawy omówione zostaną wymagania lekarskie w aspekcie uzyskania licencji pilota turystycznego PPL(A). Są one ważne ze względu na fakt, iż stanowią pierwszą barierę, dzięki której eliminowane są osoby, które ze względów zdrowotnych nie mogą ubiegać się o uprawnienia do wykonywania czynności lotniczych. Kandydaci ubiegający się o licencję PPL(A) muszą posiadać orzeczenie lekarskie co najmniej 2. klasy. W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną wstępne badania lotniczo-lekarskie, ponieważ są one istotne w aspekcie rozpoczęcia szkolenia lotniczego oraz ubiegania się o wydanie licencji pilota turystycznego. Wnioskodawca ubiegający się o wydanie orzeczenia lekarskiego przed badaniem lekarza orzecznika i decyzją o wystawieniu orzeczenia zostaje poddany badaniom wstępnym. Badania wstępne obowiązujące dla poszczególnych klas przedstawiono w tabeli 3.3. Zgodnie z obowiązującymi przepisami przyszły pilot turystyczny musi posiadać orzeczenie lekarskie co najmniej 2. klasy. Porównując badania wstępne potrzebne do uzyskania orzeczenia dla danej klasy można zauważyć, że dla orzeczenia 2. klasy weryfikacja jest pomniejszona o testy psychologiczne oraz RTG klatki piersiowej – są one przeznaczone dla pilotów zawodowych (CPL) oraz liniowych (ATPL) [71, 123].

Informacje na temat zakresu badań wstępnych pochodzą ze strony internetowej jednego z Centrum Medycyny Lotniczej, znajdującego się we Wrocławiu. Jest to Główny Ośrodek Badań Lotniczo-Lekarskich (GOBLL).

Tabela 3.3. Zakres badań wstępnych z podziałem na klasę orzeczenia [24, 34]

Orzeczenie 1. klasy	Orzeczenie 2. klasy
Badania laboratoryjne	Badania laboratoryjne
EKG	EKG
Audiogram, tympanometria	Audiogram, tympanometria
Spirometria	Spirometria
Badanie okulistyczne	Badanie okulistyczne
Badanie laryngologiczne	Badanie laryngologiczne
Badanie neurologiczne	Badania neurologiczne
Badanie przez lekarza orzecznika	Badanie przez lekarza orzecznika
Badania psychologiczne	X
RTG klatki piersiowej z opisem (zazwyczaj we własnym zakresie)	X

Badania lotniczo-lekarskie stanowią złożone zagadnienie, jednak wszystkie działania opisane w niniejszym rozdziale są skierowane na selekcję negatywną, polegającą na wyeliminowaniu osób, których warunki psychofizyczne wykluczają posiadanie uprawnień do wykonywania czynności lotniczych. Podczas badań zaświadcza się, iż wnioskodawca jest w odpowiednim stanie fizycznym i może zostać upoważniony do przeprowadzenia operacji lotniczych. Badania lotniczo-lekarskie jednak w niewielkim stopniu wpływają na bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych w lotnictwie ogólnym, ze względu na zbyt rzadkie kontrole stanu zdrowia osób upoważnionych – raz na 5 lat (Tab. 3.2). Po otrzymaniu orzeczenia lekarskiego oraz zapisaniu się na szkolenie lotnicze w ośrodku ATO, w trakcie szkolenia lotniczego kandydat posiada status ucznia-pilota.

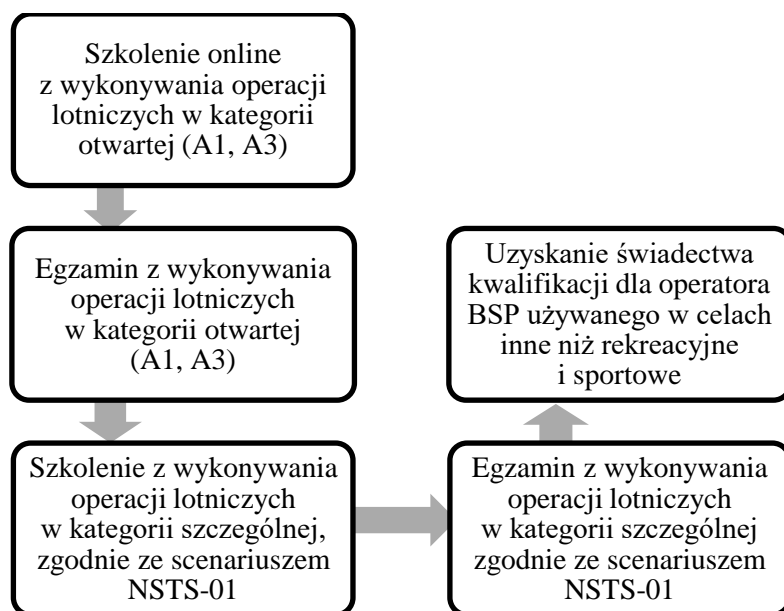
W aspekcie upoważnienia uczniów-pilotów oraz uczniów-operatorów do wykonywania czynności lotniczych poza oceną stanu fizycznego ważny jest sam przebieg szkolenia lotniczego. W celu dokonania analizy obecnych przepisów dotyczących szkoleń podstawowych w lotnictwie ogólnym oraz programów szkolenia lotniczego i egzaminów na początku należy zapoznać się z ich przebiegiem. W niniejszym rozdziale kolejno omówiono obowiązujące zasady przeprowadzania szkoleń oraz egzaminów w podstawowych szkoleniach lotniczych z podziałem na bezzałogowe oraz załogowe statki powietrzne. Rozporządzenie [93] stosowane jest od dnia 31.12.2020 roku i określa sposób wykonywania operacji bezzałogowymi statkami powietrznymi oraz przepisy przeprowadzania szkoleń na operatora BSP. Zgodnie z niniejszymi przepisami szkolenia z zakresu operatora bezzałogowego statku powietrznego w celach innych niż rekreacyjne i sportowe można podzielić na trzy podstawowe kategorie: otwarta, szczególna oraz certyfikowana. Kategorie zostały scharakteryzowane w następujący sposób [118]:

- kategoria otwarta (ang. *open*): obejmuje operacje VLOS, nie wymagające uzyskania zgody oraz dotyczą BSP o masie poniżej 25 kg i lotów do maksymalnej wysokości 120 m nad terenem (lub ponad przeszkodą wyższą niż 120 m), w których ryzyko dla osób trzecich jest bardzo małe; kategoria ta zawiera dodatkowe trzy podkategorie lotów: A1, A2 i A3, różniące się zasadami ich wykonywania,

- kategoria szczególna (ang. *specific*): obejmuje operacje VLOS/BVLOS wymagające uzyskania zezwolenia od właściwego organu z racji większego ryzyka dla osób trzecich (operacje, które przekraczają ograniczenia kategorii otwartej),
- kategoria certyfikowana (ang. *certified*): obejmuje operacje VLOS/BVLOS, które wymagają certyfikacji bezzałogowego systemu powietrznego na podstawie rozporządzenia delegowanego (UE) 2019/945 i certyfikacji operatora oraz personelu w zakresie operacji wysokiego ryzyka dla osób postronnych, np. podczas przewozu materiałów niebezpiecznych.

Szkolenie lotnicze wybrane w ramach rozprawy jest szkoleniem upoważniającym do wykonywania operacji lotniczych VLOS bezzałogowym statkiem powietrznym o masie do 4 kg w kategorii szczególnej, zgodnie z Krajowym Scenariuszem Standardowym NSTS-01. Operator posiadający upoważnienie NSTS-01 może wykonywać operacje lotnicze w zasięgu wzroku VLOS BSP, których masa startowa TOM (ang. *Take off mass*) nie przekracza 4 kg. Prezes ULC nie ogranicza typu BSP, który może być używany do takich lotów tzn., że operator może wykonywać loty wielowirnikowcami MR (ang. *multi rotor*), samolotami A (z ang. *aircraft*) oraz śmigłowcami H (ang. *helicopter*). Operator BSP z uprawnieniem NSTS-01 może wykonywać operacje lotnicze w zasięgu wzroku VLOS z zachowaniem bezpiecznej odległości od osób i mienia. O tym jaka to ma być odległość nie decyduje przepis prawny (tak jak w A1/A2/A3) tylko sam operator BSP. W celu określenia bezpiecznej odległości bierze on pod uwagę czynniki omawiane na szkoleniu lotniczym NSTS-01.

Na rysunku 3.3 przy użyciu schematu przedstawiono kolejne etapy kształcenia ucznia-operatora, aż do uzyskania upoważnienia w kategorii szczególnej.



Rys. 3.3. Etapy kształcenia ucznia-operatora [opracowanie własne na podstawie 118]

W celu uzyskania upoważnienia do wykonywania operacji lotniczych w kategorii szczególnej najpierw należy odbyć szkolenie w kategorii otwartej, w której można wyróżnić trzy podkategorie, podzielone ze względu na ryzyko jakim obciążone jest wykonywanie operacji lotniczej [118]:

- A1 – dopuszcza się przelot nad osobami postronnymi (z pewnymi ograniczeniami), ale nie wolno wlatywać nad zgromadzenia osób, za które uważa się grupę ludzi, w której zagęszczenie osób uniemożliwia im przemieszczanie się,
- A2 – nie wolno wlatywać nad osoby i zgromadzenia osób, a minimalna odległość pozioma od osób to 30 m lub 5 m jeżeli BSP posiada funkcję ograniczającą prędkość lotu (funkcja ta ogranicza prędkość lotu BSP do 3 m/s),
- A3 – nie wolno wlatywać nad osoby i zgromadzenia, a operacje BSP mogą odbywać się w bezpiecznej odległości co najmniej 150 m w poziomie od terenów mieszkaniowych, użytkowych, przemysłowych lub rekreacyjnych.

Szkolenie i egzamin w podkategorii A1 oraz A3 przebiega w formule online. Egzamin składa się z 40 pytań wielokrotnego wyboru, a warunkiem zaliczenia testu jest uzyskanie 75% poprawnych odpowiedzi. Egzamin z podkategorii A1 i A3 składa się z pytań dotyczących następujących dziedzin [95]: bezpieczeństwo lotnicze, ograniczenia korzystania z przestrzeni powietrznej, regulacje lotnicze, ograniczenia możliwości człowieka, procedury operacyjne, ogólna wiedza na temat systemów bezzałogowych statków powietrznych, ochrona prywatności i danych, ubezpieczenie, bezpieczeństwo. BSP, którymi można wykonywać operacje w kategorii otwartej, muszą spełniać następujące warunki [118]:

- należą do jednej z klas określonych w rozporządzeniu delegowanym (UE) 2019/945 lub zostały skonstruowane do użytku własnego,
- mają masę startową mniejszą niż 25 kg,
- zostały wprowadzone do obrotu przed dniem 1 stycznia 2023 r.:
 - a) w podkategorii A1 masa BSP nie przekracza 250 g z obciążeniem,
 - b) w podkategorii A3 masa BSP nie przekracza 25 kg wraz z paliwem i obciążeniem użytkowym.

W przypadku kategorii A2 szkolenie i egzamin przeprowadzane są również w formie online. Dodatkowym elementem jest szkolenie praktyczne w trybie samokształcenia [118]. Szczegółowe wymagania dotyczące programu szkolenia oraz egzaminów z wiedzy teoretycznej i praktycznej dla operatora BSP w odniesieniu do Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-01 zawarte są w Załączniku A do Wytycznych numer 15 Prezesa ULC z dnia 29 grudnia 2020 roku [25]. Najważniejsze elementy zostały przedstawione w tabeli 3.4. Zasady, jakie muszą zostać spełnione, aby szkolenie teoretyczne dla operatora BSP w odniesieniu do NSTS-01 było spełnione dotyczą jego czasu trwania, sposobu przeprowadzenia oraz realizowanego zakresu wiedzy. Nauka wiedzy teoretycznej nie może trwać krócej niż 12 godzin zegarowych. Podmiot prowadzący szkolenie teoretyczne ostatecznie określa liczbę godzin zajęć w zależności od postępów kursantów z zachowaniem obowiązującego minimum. Część teoretyczna szkolenia może zostać przeprowadzona metodą stacjonarną, online lub e-learningową. Zakres wiedzy teoretycznej obejmuje zagadnienia zebrane w tabeli 3.4. Zakres materiału jaki jest realizowany w ramach dziedzin wiedzy został szczegółowo omówiony w Załączniku A [23, 25].

Tabela 3.4. Zestawienie wytycznych dla szkolenia teoretycznego oraz praktycznego dla operatora BSP w odniesieniu do NSTS-01 [opracowanie własne na podstawie 23, 25]

	SZKOLENIE TEORETYCZNE	SZKOLENIE PRAKTYCZNE
Czas trwania	minimum 12 godzin	4 godziny (3 h lotu + 1 h szkolenia naziemnego)
Zakres wiedzy	<ol style="list-style-type: none"> 1. Przepisy lotnicze. 2. Ograniczenia możliwości człowieka. 3. Procedury operacyjne, techniczne i operacyjne środki ograniczające ryzyko w powietrzu. 4. Ogólna wiedza na temat systemów bezzałogowych statków powietrznych. 5. Meteorologia. 6. Osiągi systemu bezzałogowego statku powietrznego w locie. 7. Techniczne i operacyjne środki ograniczające ryzyko na ziemi. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Czynności przed lotem. 2. Procedury w trakcie lotu. 3. Czynności po zakończeniu lotu.
Egzamin	80 pytań wielokrotnego wyboru	Ocena umiejętności praktycznych

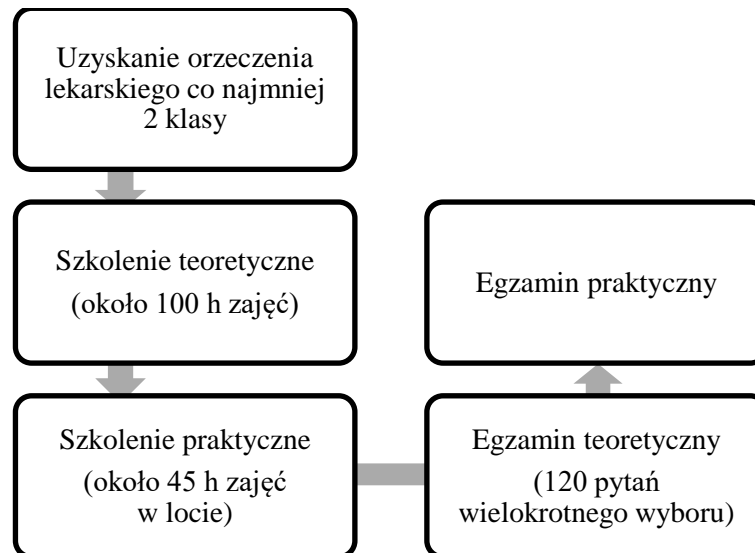
Egzamin z wiedzy teoretycznej obejmuje co najmniej 80 pytań wielokrotnego wyboru i dotyczy dziedzin wymienionych w ramach niniejszego akapitu. Uczeń-operator BSP, aby zdać egzamin teoretyczny z wynikiem pozytywnym musi uzyskać minimum 75% całkowitej liczby punktów.

Część praktyczna szkolenia w odniesieniu do NSTS-01 obejmuje trzy działy z zakresu wiedzy praktycznej. Pierwszym działem są czynności wykonywane przed lotem. Uczeń-operator powinien zapoznać się z planowaniem operacji lotniczej z uwzględnieniem aspektów dotyczących przestrzeni powietrznej i oceny ryzyka na miejscu operacji oraz dokonać przeglądu przedstartowego wraz z konfiguracją BSP. Kolejny dział szkolenia praktycznego to procedury w trakcie lotu. W ramach tego etapu uczeń-operator zapoznaje się z zasadami: przeprowadzania skutecznej obserwacji i ciągłego utrzymywania BSP w zasięgu widoczności wzrokowej, wykonywania dokładnych i kontrolowanych manewrów w locie na różnych wysokościach takich jak: zawis w miejscu, wnoszenie i zniżanie lotu poziomego, zakrętów oraz czynności po wystąpieniu awarii układu napędowego oraz monitorowania w czasie rzeczywistym stanu BSP i dotyczących go ograniczeń w zakresie maksymalnego czasu lotu. Ostatnim etapem szkolenia praktycznego są czynności po zakończeniu lotu. Na tym etapie kandydat poznaje zasady: bezpiecznego wyłączania i zabezpieczania BSP, kontroli po zakończeniu lotu, przeprowadzania odprawy na temat wykonanej operacji oraz określenia sytuacji, które wymagały sporządzenia zgłoszenia zdarzenia [23, 25]. Omówione zostały zasady przeprowadzania szkolenia oraz egzaminu w odniesieniu do wykonywania operacji lotniczych bezzałogowym statkiem powietrznym w kategorii szczególnej zgodnie z Krajowym Scenariuszem Standardowym NSTS-01.

Kolejną częścią niniejszego rozdziału jest przedstawienie zasad przeprowadzania szkolenia lotniczego oraz egzaminu do licencji pilota turystycznego PPL(A). Szkolenie upoważniające do wykonywania czynności lotniczych z zakresu PPL(A) składa się z dwóch części: teoretycznej oraz praktycznej.

Część teoretyczna to co najmniej 100 h zajęć, natomiast część praktyczna składa się z 45 h ćwiczeń w locie, z których 5 h może zostać przeprowadzone przy użyciu jednego z typów szkoleniowego urządzenia symulacji lotu FSTD. Program szkolenia praktycznego musi obejmować minimum: 25 godzin szkolenia w locie z instruktorem oraz 10 godzin czasu lotu samodzielnego pod nadzorem, w tym co najmniej 5 godzin czasu lotu samodzielnego w lotach nawigacyjnych, z czego co najmniej 1 lot nawigacyjny na odległość co najmniej 270 km (150 NM), podczas którego należy wykonać lądowania z pełnym zatrzymaniem na 2 lotniskach innych niż lotnisko odlotu [91]. Szkolenie musi być prowadzone przez zatwierdzony ośrodek szkoleniowy ATO. Uczniem-pilotem do licencji PPL(A) może zostać osoba, która ukończyła 17 lat, posiada orzeczenie lekarskie co najmniej klasy 2 oraz której biegłość językowa została oceniona na poziomie co najmniej operacyjnym – poziom 4 ICAO [93]. Standardowy przebieg szkolenia to kolejno: szkolenia teoretyczne, a następnie praktyczne. Możliwe jest jednak odbywanie szkolenia w trybie równoległym. W takim przypadku program szkolenia podzielony jest na etapy [1]. Szkolenie z wiedzy teoretycznej obejmuje takie dziedziny jak prawo lotnicze, wiedzę ogólną o statkach powietrznych i ich osiągnięciach, planowanie lotu i wyważenie, człowiek – możliwości i ograniczenia, meteorologia, nawigacja, procedury operacyjne, zasady lotu oraz łączność radiotelefoniczna [123].

Dokładną tematykę realizowaną w ramach poszczególnych dziedzin można znaleźć w Podczęści C Rozporządzenia Komisji UE nr 117/2011 [93] oraz w Załączniku I (Part – FCL1) do Rozporządzenia [91] – Akceptowalne sposoby potwierdzania spełnienia wymagań AMC (ang. *Acceptable Means of Compliance*) oraz materiały zawierające wytyczne GM (ang. *Guidance Material*). Zgodnie z przedstawionymi źródłami prawnymi dopuszcza się zmniejszenie liczby godzin w szkoleniu teoretycznym dla osób posiadających upoważnienia do wykonywania czynności lotniczych jako pilot śmigłowcowy turystyczny, zawodowy lub liniowy [22, 41]. Egzamin teoretyczny powinien zawierać ogółem 120 pytań wielokrotnego wyboru i obejmować wszystkie przedmioty. Szkolenie praktyczne do licencji PPL(A) składa się z 19 ćwiczeń, niektóre z nich podzielone są dodatkowo na kilka wersji, a całość szkolenia praktycznego to minimum 45 godzin. Na rysunku 3.4 przedstawiono kolejne etapy kształcenia ucznia-pilota, aż do uzyskania licencji PPL(A). Każdy ośrodek kształcenia lotniczego ATO w programie szkolenia praktycznego do licencji PPL(A) jest zobowiązany uwzględnić 19 ćwiczeń omówionych w Part FCL [93]. Kolejność wykonywanych ćwiczeń oraz ich zakres w ośrodkach szkoleniowych ATO może być różna. Podczas ustalania kolejności i zakresu ćwiczeń pod uwagę powinny być brane takie czynniki jak postępy i umiejętności ucznia-pilota, warunki pogodowe, dostępny czas lotu, uwarunkowania wynikające z techniki szkolenia, lokalne środowisko operacyjne oraz możliwość zastosowania danego ćwiczenia do typu samolotu [93]. W trakcie realizacji szkolenia praktycznego może zostać wprowadzone skrócenie czasu przeznaczanego na naukę poszczególnych ćwiczeń. Krótszy czas może być zastosowany w przypadku osób, które posiadają upoważnienie do wykonywania czynności lotniczych na inną kategorię statku powietrznego, z wyjątkiem balonów. Zmniejszenie czasu szkolenia praktycznego nie może przekroczyć 10% godzin lotów samodzielnymi i jednocześnie nie może to być więcej niż 10 h lotów.



Rys. 3.4. Etapy kształcenia ucznia-pilota do licencji PPL(A)
[opracowanie własne na podstawie 93]

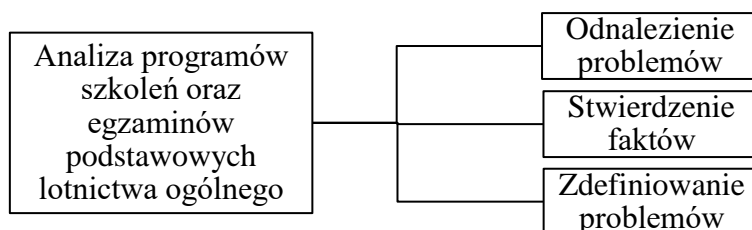
Dodatkowo po zmniejszeniu czasu szkolenia praktycznego, zgodnie z obowiązującymi przepisami, czas lotów szkolnych z instruktorem nie może być mniejszy niż 20 h [22, 41]. Zaliczenie nie może obejmować wymagań dotyczących liczby godzin lotów samodzielnych i czasu lotu samodzielnego w lotach nawigacyjnych. Po zakończeniu szkolenia praktycznego uczeń-pilot może przystąpić do egzaminu praktycznego. Trasa lotu egzaminującego zostaje wybrana przez egzaminatora. Uczeń-pilot odpowiada za planowanie lotu oraz w jego obowiązku jest, zadbanie o to, aby na pokładzie samolotu znajdowało się niezbędne wyposażenie oraz dokumentacja potrzebna do wykonania operacji lotniczej. Zakres egzaminu praktycznego do licencji PPL(A) składa się z 6 sekcji: czynności przed lotem, pilotaż, procedury podczas przelotu, procedury podejścia do lądowania i lądowanie, procedury w sytuacja anormalnych i awaryjnych, lot z symulowaną asymetrią ciągu oraz elementy odpowiednie dla klasy lub typu. Każda z realizowanych sekcji składa się z kilku elementów. Podczas wykonywania każdej z nich obowiązuje korzystanie z list kontrolnych samolotu, pilotowanie według zewnętrznych punktów odniesienia, stosowanie odpowiednich do sytuacji procedur np. procedury odlodzeniowe oraz wykorzystanie umiejętności lotniczych. Przebieg egzaminu może być modyfikowany, zależnie od decyzji egzaminatora. Podczas oceny egzaminu praktycznego obowiązuje zakres tolerancji dla wykonywanej operacji lotniczej. Mają one jednak charakter ogólny i egzaminator może podczas oceny, uwzględniając właściwości pilotażowe i osiągi samolotu, na którym przeprowadzany jest egzamin akceptować wyniki poza ustalonym zakresem tolerancji [93]. Zgodnie z zasadami oceniania egzaminu praktycznego zawartymi w Rozporządzeniu [93] niezaliczenie jednego elementu sekcji powoduje jej niezaliczenie. W przypadku niezaliczenia więcej niż jednej sekcji dochodzi do niezdania egzaminu [93]. W przypadku gdy uczeń-pilot nie zaliczy tylko jednej sekcji, powtarza tylko tę sekcję. W razie potrzeby powtórzenia egzaminu niezaliczenie którejkolwiek z sekcji, a dotyczy to również sekcji zdanych przy poprzednim podejściu, powoduje niezaliczenie całego egzaminu [93].

W przypadku gdy uczeń-pilot nie otrzyma zaliczenia wszystkich sekcji egzaminu w dwóch podejściach, musi odbyć dodatkowe szkolenie.

W niniejszym rozdziale przedstawiono wymagania jakie muszą spełniać uczeń-operator oraz uczeń-pilot w celu zdobycia upoważnienia do wykonywania określonych czynności lotniczych. Przedstawiono również przebieg szkolenia teoretycznego oraz praktycznego dla szkoleń podstawowych w lotnictwie ogólnym.

3.2. Analiza wytycznych do programów szkoleń oraz egzaminów w szkoleniach podstawowych lotnictwa ogólnego

W aspekcie rozprawy analiza wytycznych do programów szkoleń oraz egzaminów w szkoleniach podstawowych lotnictwa ogólnego ma wskazać problemy związane z ich przebiegiem oraz obszary, które mogłyby zostać zmodyfikowane. W celu dokonania dokładnej analizy obowiązujących wytycznych proces podzielono na 3 części (Rys. 3.5).



Rys. 3.5. Schemat przeprowadzanej analizy wytycznych do programów szkoleń oraz egzaminów w szkoleniach podstawowych lotnictwa ogólnego [opracowanie własne]

Etap 1: Odnalezienie problemów

W zagadnieniach omawianych w ramach opracowywanej dysertacji problemem jest znaczący udział wypadków i poważnych incydentów występujących w trakcie lotów instruktorskich, wśród wszystkich wypadków dotyczących wykonywania operacji samolotami. Dokładne omówienie zagadnienia wraz z analizą danych liczbowych przedstawiono we wprowadzeniu do tematyki rozprawy. Wraz ze zwiększaniem się liczby wspomnianych zdarzeń lotniczych, każdego roku można zaobserwować znaczne zwiększenie się liczby wydawanych uprawnień. Dynamiczny rozwój lotnictwa cywilnego, a zwłaszcza sektora lotnictwa ogólnego wpływa na bezpieczeństwo szkoleń lotniczych oraz czas i sposób ich przeprowadzania. Zauważalnym problemem jest również brak odnajdywania przez instruktorów bezpośredniej przyczyny danego zachowania/niepowodzenia ucznia-pilota lub ucznia-operatora.

Etap 2: Stwierdzenie faktów

Po przedstawieniu przepisów i procedur obowiązujących w szkoleniach oraz egzaminach podstawowych lotnictwa ogólnego można wymienić następujące fakty:

- a) szkolenie na operatora bezzałogowego statku powietrznego w warunkach VLOS i scenariuszu krajowym NSTS-01

- liczba godzin części praktycznej w programie szkolenia ucznia-operatora do świadectwa kwalifikacji zgodnego z kategorią specjalną i scenariuszem NSTS-01 wynosi tylko 4 h, spośród których 1 h przeznaczona jest na szkolenie na ziemi; zgodnie z zebranymi danymi i ich analizą (Tab. 3.5) można zauważyć, że na poszczególne ćwiczenie w trakcie procedur lotu przeznaczone jest jedynie 30 min,
- w programie szkolenia (VLOS, NSTS-01) brak jest zapisów, dotyczących np. wykonywania ćwiczeń symulujących sytuacje awaryjne, jak np. utracenie kontaktu wzrokowego z BSP, pojawienie się niepożądanych osób w pobliżu operatora BSP czy wystąpienia awarii systemów sterujących BSP.

Tabela 3.5. Analiza czasu przeznaczonego na poszczególne ćwiczenia w szkoleniu na operatora BSP w warunkach VLOS i scenariuszu krajowym NSTS-01 (opracowanie własne na podstawie [23, 25])

ETAP	ĆWICZENIE	CZAS
Czynności przed lotem	określanie celów planowanej operacji,	30 min
	wykrywanie przeszkód,	
	analizowanie odpowiednich dane dotyczących informacji przestrzeni powietrznej,	
	wprowadzanie niezbędnych środków i procedur umożliwiających wykonanie operacji w przestrzeni powietrznej,	
	informowanie innych uczestników o planowanej operacji,	
	ocenianie stanu systemu BSP,	
	kalibrowanie instrumentów BSP,	
	upewnianie się, że wszystkie systemy BSP niezbędne są aktywne i sprawne,	
Procedury w locie	aktywowanie funkcji świadomości przestrzennej oraz konfiguracja systemów ograniczających wysokość i prędkość lotu.	3h/ 6 ćwiczeń to około 30 min na jedno ćwiczenie
	przeprowadzanie skutecznej obserwacji i ciągłego utrzymywania BSP w zasięgu widoczności wzrokowej,	
	zawis w miejscu,	
	wznoszenie i zniżanie lotu poziomego,	
	zakręty,	
Czynności po zakończeniu lotu	czynności po wystąpieniu awarii układu napędowego,	30 min
	monitorowanie w czasie rzeczywistym stanu BSP.	
	bezpieczne wyłączenie i zabezpieczenie BSP,	
	kontrola po zakończeniu lotu,	
	przeprowadzenie odprawy na temat wykonanej operacji lotniczej.	

b) szkolenie do licencji pilota turystycznego PPL(A)

- zgodnie z obowiązującymi przepisami w trakcie szkolenia do licencji pilota turystycznego musi wystąpić minimum 10 h lotów samodzielnych,
- na ćwiczenie korkociągu oraz przeciągnięcia przewiduje się około 2 h szkolenia praktycznego,
- w trakcie szkolenia występuje sprawdzenie przez instruktora opanowania procedur po pierwszym locie samodzielnym,

- w programach szkoleń często stosowane są tzw. skróty, polegające na skróceniu czasu szkolenia, a decyzyjność w tym obszarze ma instruktor,
- zgodnie z obowiązującymi przepisami również egzamin może być modyfikowany zależnie od subiektywnej oceny egzaminatora,
- niektóre z zadań egzaminacyjnych przewidziane są jedynie dla jednosilnikowego samolotu.

Przykładowy program szkolenia, opracowany przez Aeroklub Polski w 2010 roku, podzielony jest na 5 zadań. W każdym z nich występuje kilkanaście ćwiczeń do zrealizowania. Sumaryczne liczby godzin dla poszczególnych zadań zebrano w tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Godziny przeznaczone na poszczególne zadania w przykładowym programie szkolenia do licencji pilota samolotowego turystycznego [opracowanie własne na podstawie 1]

Zadanie	Nazwa zadania	Loty z instruktorem	Loty samodzielne
ZADANIE A	Nauka pilotażu podstawowego	11 h 20 min	2 h
ZADANIE B	Loty wg wskazań przyrządów	3 h 10 min w tym 2 h 30 min (symulator)	X
ZADANIE C	Loty nawigacyjne VFR	20 h 30 min	5 h
ZADANIE D	*Przeszkolenie na nowy typ samolotu klasy SEP(L)	2 h 30 min	1 h
ZADANIE E	*Loty nocne VFR	4 h 30 min	30 min
SUMA		39 h 30 min (samolot) 2 h 30 min (symulator)	8 h 30 min
ŁĄCZNIE		48 h + 2 h 30 (symulator)	

*Zadania nieobowiązkowe

Dodatkowo w programach szkoleń można znaleźć zapisy, iż maksymalną dzienną liczbę i czas wykonywania lotów szkolnych z instruktorem i samodzielnych określa instruktor szkolący lub nadzorujący z uwzględnieniem predyspozycji i samopoczucia ucznia-pilota, etapu szkolenia i warunków atmosferycznych oraz norm czasów lotów określonych w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 13 grudnia 2002 r. z późniejszymi zmianami, chyba że w wskazówkach wykonawczych ćwiczeń podano inne ograniczenia.

Na podstawie przytoczonych w niniejszym rozdziale zapisów można sformułować kolejne fakty:

- występuje brak wskazania w jaki sposób instruktor ma uwzględniać predyspozycję i samopoczucie ucznia-pilota lub ucznia-operatora,
- czas przeznaczony na część praktyczną szkolenia ucznia-operatora jest bardzo mały, 30 min na poszczególne ćwiczenie może nie być wystarczające dla niektórych kandydatów, aby w sposób prawidłowy opanować poszczególne manewry,
- ocena predyspozycji i samopoczucia ucznia następuje jedynie w wyniku subiektywnej oceny instruktora,
- subiektywna ocena instruktora zwykle nie jest poparta wiedzą merytoryczną z zakresu zachowania ludzkiego oraz reakcji na dane sytuacje lub bodźce.

Kolejnym krokiem w analizie wytycznych jest zdefiniowanie występujących problemów, na podstawie odkrytych faktów.

Etap 3: Zdefiniowane problemów

W związku z zebranymi faktami w ramach analizy wytycznych do programów szkoleń oraz egzaminów w lotnictwie ogólnym można stwierdzić, że podstawowymi problemami w podstawowych szkoleniach lotnictwa ogólnego są:

1. Zależność oceny predyspozycji i samopoczucia ucznia-operatora oraz ucznia-pilota do wykonywania poszczególnych ćwiczeń oparta na subiektywnej ocenie instruktora.
2. Subiektywna ocena wykonania przez ucznia-pilota oraz ucznia-operatora poszczególnych ćwiczeń.
3. Brak stosowania metod obiektywnych, opartych na behawiorystyce do oceny czynności wykonywanych przez uczniów-pilotów oraz uczniów-operatorów w trakcie szkolenia.
4. Niewielka ilość czasu przeznaczona na poszczególne ćwiczenia.
5. W regulacjach prawnych nie ma informacji o możliwości dostosowania programu szkolenia do indywidualnych potrzeb i predyspozycji kandydata.

Zdefiniowane problemy dotyczą przeprowadzania oceny umiejętności ucznia-pilota i ucznia-operatora przez instruktorów lotniczych oraz braku elastyczności w dostosowywaniu programów szkolenia pod indywidualne potrzeby kandydatów. Zdefiniowane problemy postanowiono scharakteryzować jako te dotyczące efektywności podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego, która w aspekcie rozprawy dotyczy zapewnienia bezpieczeństwa.

Przykładem rozwiązania wskazanych w niniejszym rozdziale problemów jest rodzaj szkolenia lotniczego tzw. szkolenie oparte na dowodach EBT (ang. *Evidence Based Training*). Jest to szkolenie stosowane jedynie w komercyjnym transporcie lotniczym i dotyczy pilotów liniowych. Można wyróżnić dwa podstawowe dokumenty regulujące zasady przeprowadzania szkolenia EBT. Jest to Instrukcja Szkolenia [78] opracowana przez ICAO oraz Podręcznik Wdrażania Szkolenia opracowany przez Międzynarodowe Zrzeszenie Przewoźników Powietrznych IATA (ang. *International Air Transport Association*). EBT to szkolenie oparte na ocenie wyników uzyskiwanych przez pilotów.

W ramach programu szkolenia opracowane zostały obszary kompetencji, które są oceniane przez instruktorów. Jeżeli dany obszar kompetencji zostaje przez instruktora oceniony, jako niespełniający oczekiwanego poziomu, musi zostać to powiązane z możliwym do zaobserwowania zachowaniem osoby szkolonej. W trakcie szkolenia, sprawdzane są następujące kompetencje [80]:

- stosowanie procedur,
- komunikacja,
- zarządzanie ścieżką lotu samolotu pod względem automatyzacji,
- zarządzanie ścieżką lotu samolotu pod względem kontroli manualnej,
- przywództwo i praca zespołowa,
- podejmowanie decyzji,
- zarządzanie obciążeniem zadaniowym.

Założeniem szkolenia EBT jest konieczność oceny kompetencji, ponieważ dzięki niej piloci uczą się skuteczniej. Instruktorzy przygotowują pilotów do wykonywania zadań i zarządzania zdarzeniami zgodnie z danym zestawem wskaźników behawioralnych. EBT wymaga od instruktorów analizy przyczyn źródłowych poszczególnych braków kompetencji, tak aby móc skorygować niewłaściwe działania. Podczas szkolenia EBT instruktor odnajduje bezpośrednią przyczynę w zachowaniu danej osoby [36]. EBT stanowi przykład niekonwencjonalnego systemu oceny pilota oraz może być podstawą do rozważań nad wprowadzeniem innych, niż obecnie stosowane, metod oceny ucznia w trakcie szkoleń lotniczych, zaczynając od tych podstawowych, które zdefiniowano w ramach niniejszej rozprawy.

Dotychczasowa analiza programów szkoleń podstawowych lotnictwa ogólnego wskazuje na potrzebę stosowania w trakcie realizacji treningu przez ucznia-pilota i ucznia-operatora metod, które umożliwią w sposób obiektywny dokonanie oceny stanu psychofizycznego kandydata. Pozwoliłoby to na łatwiejsze odnajdowanie źródeł nieprawidłowości w wykonywaniu przez ucznia poszczególnych manewrów oraz dostosowanie przebiegu szkolenia do indywidualnych potrzeb kandydata.

4. Analiza dostępnych metod z zakresu oceny niezawodności człowieka oraz monitorowania stanu psychofizycznego

4.1. Metody oceny niezawodności człowieka

W celu wybrania metod, które mogą mieć zastosowanie w ocenie ucznia-pilota oraz ucznia-operatora w trakcie szkolenia lotniczego postanowiono przeanalizować metody z zakresu niezawodności człowieka HRA (ang. *Human Reliability Analysis*) oraz oceny stanu psychofizycznego. Na podstawie źródeł literaturowych można wyróżnić wiele metod służących ocenie niezawodności człowieka [35, 50, 59, 79, 127]. Są to metody ilościowe często oparte na drzewach zdarzeń [90] oraz opracowanych wskaźnikach, wyznaczanych na podstawie wartości zawartych w tabelach, a ocena niezawodności człowieka w wybranym systemie polega na obliczeniu prawdopodobieństwa wystąpienia błędu, popełnionego przez np. operatora maszyny [35, 50, 54, 59, 108]. Tabele, zawierające określone wskaźniki i odpowiadające im wartości wyznaczone są na podstawie badań oraz obserwacji prowadzonych w danych systemach M-T-E (ang. *man-technology-environment*) [76, 79]. Są to metody mające głównie zastosowanie w systemach M-T-E takich jak np. zakłady produkcyjne, czy operowanie różnymi środkami transportu. W ramach realizacji niniejszego rozdziału wybrano metody, które są najczęściej stosowane w transporcie.

Pierwszą z wybranych jest THERP (ang. *Technique for Human Error Rate Prediction*). Należy do jednych z najczęściej stosowanych w praktyce metod HRA. Główną zaletą metody jest jej szeroka akceptowalność i dobra dokładność. Istotnym aspektem jest również fakt, że dokładność analizy zależy od zaangażowania wykonawcy. Jednakże metoda ta cechuje się dużymi wymaganiami dotyczącymi zasobów oraz brakiem zaleceń korekcyjnych. Analiza niezawodności człowieka w oparciu o metodę THERP składa się z czterech podstawowych faz: rozpoznania problemu, oceny jakościowej, oceny ilościowej oraz badania i wykorzystania wyników. Reprezentacją graficzną tej metody są drzewa zdarzeń analizy niezawodności człowieka (drzewa HRA). Po zdefiniowaniu poszczególnych zdarzeń, uwzględnionych w drzewach HRA, możliwe jest wyznaczenie wskaźników probabilistycznych sukcesu i niepowodzenia analizowanego zadania. Metoda ta może być z powodzeniem wykorzystywana do ilościowej oceny niezawodności człowieka głównie w przemyśle np. w elektrowniach jądrowych [83, 90], jest również szeroko stosowana do oceny operatora w czasie sytuacjach awaryjnych [55] czy do oszacowania niezawodności maszynisty pociągu [35].

Kolejną omawianą metodą jest HEART (ang. *Human Error Assessment and Reduction Technique*). Procedura postępowania HEART opiera się na określeniu prawdopodobieństwa błędu za pomocą prostego równania składającego się z następujących współczynników: czynnik wpływu IF (ang. *Impact Factor*), przewidywany współczynnik efektu PEF (ang. *Predicted Effect Factor*), waga przewidywanego współczynnika efektu VPEF (ang. *Validity Of The Predicted Impact Factor*), proponowana nominalna zawodność człowieka PNHU (ang. *Proposed Nominal Human Unreliability*). Następnie współrzędne są przyjmowane na podstawie

tabel, zawierających zadania ogólne oraz współczynniki korygujące, którym odpowiadają konkretne wartości liczbowe (Tab. 4.1) [30, 59]. W tabeli przedstawione zostały przykładowe zadania ogólne. Dla analizowanego zadania dobiera się odpowiadające mu zadanie ogólne, a następnie wyznacza się prawdopodobieństwo błędu człowieka zależne od iloczynu współczynników korekcyjnych (PEF), których jest około 40 i opisują warunki wpływające niekorzystnie na działanie człowieka [79].

Tabela 4.1. Przykłady ogólnych typów zadań i odpowiadające im PNHU [30]

Typ zadania	Opis	PNHU
A	Całkowicie nieznan, wykonany z dużą szybkością bez prawdziwego pojęcia prawdopodobnych konsekwencji	0,55
B	Zmiana lub przywrócenie systemu do nowego lub pierwotnego stanu za pomocą jednej próby bez nadzoru lub procedur	0,26
C	Złożone zadanie wymagające wysokiego poziomu zrozumienia i umiejętności	0,16
D	Dość proste zadanie, wykonywane szybko lub z niewielką uwagą	0,09
...		
M	Różne zadania, dla których nie można znaleźć opisu	0,03

Przeprowadzenie analizy składa się z następujących kroków:

1. Przyjęcie nominalnego prawdopodobieństwa błędu (PNHU) na podstawie tabeli 4.1, w którym uwzględniono podział zadań wykonywanych przez operatora ze względu na ich rodzaj.
2. Dobór współczynników korygujących (PEF) dla każdego zadania na podstawie tabeli [30], która zawiera warunki wpływające na popełnienie błędu przez operatora.
3. Przyjęcie dla każdego współczynnika korygującego (PEF) jego wagi (VPEF), o wartości z zakresu od 0 do 1.
4. Na podstawie wartości z punktów 2 i 3 obliczenie współczynnika wpływu (IF):

$$IF(n)=(PEF-1) \cdot VPEF+1 \quad (2)$$

5. Obliczenie prawdopodobieństwa wystąpienia błędu (P(M)), jako iloczynu współczynników wpływu (IF) dla analizowanego zadania oraz przyjętej wartości nominalnej zawodności człowieka (PNHU):

$$P(M)=PNHU(N) \cdot IF(1) \cdot IF(2) \cdot \dots \cdot IF(n) \quad (3)$$

6. Obliczenie względnego wpływu poszczególnych czynników (RI) na prawdopodobieństwo błędu, jako ilorazu dane współczynnika wpływu (IF) i sumy współczynników wpływu w danym zadaniu:

$$RI(n)=IF(n)/\sum [IF(n)] \quad (4)$$

Przykładem zastosowania metody jest ocena niezawodności operatora statku powietrznego w trakcie wykonywania procedur przedstartowych i startowych oraz ocena błędów ludzkich w wypadkach statków [10, 59].

Kolejną omawianą metodą jest empiryczna technika obliczania błędów operatora TESEO (z wł. *Tecnica Empirica Stima Errori Operatori*). Prawdopodobieństwo błędu ludzkiego obliczane jest na podstawie iloczynu pięciu współczynników dostępnych

w opracowaniu [20]. Wartości współczynników przypisanych poszczególnym czynnikom, przewidzianym przez autorów systemu dobierane są z opracowanych tablic [20].

Uwzględniono następujące czynniki wewnętrzne i zewnętrzne oddziałujące na operatora [79]: rodzaj realizowanego zadania, czas dostępny na realizację zadania (nazwany tu wstępnie czynnikiem stresu), charakterystyka człowieka pełniącego daną funkcję, w tym szczególnie jego przygotowanie do wykonania powierzonego mu zadania, z uwzględnieniem jego wykształcenia i nawyków, stan emocjonalny operatora (nazwany czynnikiem obawy), charakterystyki środowiska np. czynnik ergonomiczny. Wadami TESEO są brak informacji, dotyczących teoretycznych podstaw opracowanej metody. Nie są znane dane uwzględnianie przy tworzeniu modelu. Brak jest również dowodu słuszności dla założonej liniowości modelu (polegającej na prostym mnożeniu wybranych wartości dokładnie pięciu współczynników). Dodatkowo, w metodzie przyjmuje się, że niezależnie od sytuacji, pięć wymienionych czynników jest wystarczające dla właściwej oceny ludzkiego działania [79]. Przykładem zastosowania metody może być analiza zagrożeń w ruchu lotniczym [82] oraz analiza zagrożeń podczas załadunku chemikaliowców [15].

Ostatnią wybraną metodą oceny niezawodności człowieka jest HCR (ang. *Human Cognitive Reliability*). W metodzie tej określa się wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu w funkcji deficytu czasu, jaki występuje na wykonanie zadania i typu czynności. Oprócz zależności od czasu występują również czynniki określające działanie człowieka, takie jak doświadczenie operatora, poziom stresu oraz ergonomiczność stanowiska. Wszystkie współczynniki dobierane są subiektywnie, co stanowi znaczną wadę metody. W modelu (5) wykorzystywane są: czas dostępny na realizację zadania, średnia wartość czasu zazwyczaj potrzebna do wykonania zadania w warunkach normalnych, współczynniki korekcyjne zależne od typu czynności.

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t - t_{0,5} - C_{a,i}}{C_{g,i}}\right)^{B_i}, \text{ gdzie} \quad (5)$$

- t – czas dostępny na wykonanie zadania,
- $t_{0,5}$ – czas średni zwykle wystarczający na wykonanie zadania,
- $C_{a,i}$, $C_{g,i}$, B_i – współczynniki zależne od typu czynności (odruchy, reguły, wiedza), uzyskiwane z kalibracji modelu na symulatorze treningowym.

Zastosowanie wartości współczynników korekcyjnych, związanych z poszczególnymi czynnikami wpływającymi na prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez człowieka w modelu opracowanym przez autorów metody, wymaga jego kalibracji metodami symulacyjnymi, eksperymentami lub analizą statystyczną wcześniej zaistniałych i udokumentowanych zdarzeń. Zaletami metody są: jej efektywność i uwzględnianie w modelu różnorodnych czynników wpływających na niezawodność człowieka. Wpływ doświadczenia, stresu i ergonomii, opisanych współczynnikami K_1 , K_2 i K_3 , uwzględniany jest w wartości czasu $t_{0,5}$ w konkretnych warunkach, zgodnie z zależnością (6):

$$t_{0,5} = |t_{0,5nom}(1 + K_1) \cdot (1 + K_2) \cdot (1 + K_3)| \quad (6)$$

Do wad metody HCR należy ograniczony zakres jej zastosowań, ze względu na wykorzystanie funkcji deficytu czasowego, brak uwzględnienia innych czynników (poza czasem), uwzględnienie w modelu rodzaju błędu, polegającego jedynie na braku prawidłowej reakcji człowieka. Dodatkowo wadami są niejasne reguły podziału sposobu przetwarzania informacji przez człowieka na czynności odruchowe, wykorzystujące procedury i oparte na wiedzy, niezbędna kalibracja modelu przy użyciu symulatora zdarzeń lub podobnych metod, brak uwzględnienia zależności zdarzeń (omawiane wcześniej). Metoda była wykorzystana do oceny wpływu czynnika ludzkiego na bezpieczeństwo w przemyśle jądrowym [29]. Podejmowano próby modyfikacji metody, tak aby udoskonalili proces uwzględnienia i klasyfikowania wzorców poznawczych ludzi, który często opiera się na wysoce subiektywnych i niepewnych opiniach ekspertów [10].

4.2. Metody określania stanu psychofizycznego

Pojęcie stanu psychofizycznego wywodzi się z nauki, jaką jest psychofizyka, która zajmuje się relacjami zachodzącymi pomiędzy właściwościami bodźców działających na organizm człowieka, a wrażeniami psychicznymi [18]. Stan psychofizyczny określa zatem wpływ poszczególnych bodźców fizycznych, na psychikę człowieka. Metody określania stanu psychofizycznego można podzielić na subiektywne oraz obiektywne. Wśród rodzajów metod oceny stanu psychofizycznego możliwe jest wyróżnienie dodatkowo metod behawioralnych [33]. Polegają one na łączeniu zagadnień psychologii z metodami inżynierskimi i w sposób obiektywny określają relację pomiędzy bodźcem, a reakcją człowieka [33]. Biorąc pod uwagę fakt, iż metody behawioralne opierają się na wykorzystaniu pomiarów wykonanych metodami obiektywnymi postanowiono zaliczyć je do wspomnianego rodzaju metod. W ramach niniejszego rozdziału zostanie przedstawionych kilka, najczęściej stosowanych metod z każdego rodzaju. Pierwszą z nich są metody subiektywne.

Podstawą metod subiektywnych, służących ocenie stanu psychofizycznego np. pilota, są własne spostrzeżenia osoby badanej i polegają na użyciu szeroko pojętych kwestionariuszy do oceny stanu osoby badanej.

Do metod subiektywnych należą analizy oparte na wykorzystaniu kwestionariuszy, takie jak: profil obciążenia zadaniowego WP (ang. *Workload Profile*), kwestionariusz obciążenia zadaniowego NASA TLX (ang. *Task Load Index*), subiektywna technika oceny obciążenia zadaniowego SWAT (ang. *Subjective Workload Assessment Technic*), Skala obciążenia zadaniowego Bedford'a (ang. *Bedford Worload Scale*) oraz Skala oceny McDonell'a (ang. *McDonell Rating Scale*). W pracy przedstawione zostaną metody: WP, SWAT oraz NASA TLX.

W kwestionariuszu WP badana osoba określa proporcje w jakich jej zasoby uwagi zostały zaangażowane w wykonanie określonych zadań. Pytania, na podstawie których dokonywana jest ocena obciążenia, rozmieszczone są w wersach tabeli, w losowej kolejności, a wartości, względem których oceniane jest obciążenie znajdują się w kolumnach. Osobie badanej podawane są definicje dla poszczególnych wartości obciążenia. Skala oceny jest dwuwartościowa – 0 lub 1. Ocena 0 oznacza, że zadanie

nie było obciążające, a ocena 1, że zadanie wymagało istotnego zaangażowania uwagi osoby badanej. Suma poszczególnych wymiarów obciążania stanowi ocenę łączną [8].

Metoda subiektywna SWAT uwzględnia trzy obszary obciążenia: czas, wysiłek umysłowy oraz stres. Osoba badana każdemu obszarowi nadaje jedną z trzech wartości obciążenia: 1-małe, 2-średnie, 3-wysokie. Pierwszym zadaniem osoby badanej, jeszcze przed rozpoczęciem właściwego badania, jest ułożenie 27 kart z rysunkami, rosnąco zgodnie z preferencjami od najmniejszego do największego obciążenia [33]. Przeprowadzenie techniki SWAT polega na ustawieniu czynników rosnąco, względem odczuwanego obciążenia. Kolejnym etapem jest obliczenie proporcji poszczególnych wymiarów względem siebie przy użyciu algorytmu powstałego w ramach etapu poprzedzającego (układanie 27 kart) [59].

Kolejną omawianą techniką jest NASA TLX. Jest to metoda, w której badany sam ocenia swoje obciążenie zadaniowe na podstawie sześciu kategorii: obciążenie umysłowe, obciążenie fizyczne, presja czasu, wydolność, wysiłek, frustracja. W 2010 roku dwóch polskich psychologów [8] dokonało analizy psychometrycznej polskiego przekładu narzędzia. Badanie przy użyciu omawianego kwestionariusza podzielone jest na dwie części: wypełnianie zadania porównawczego oraz ocena każdej z kategorii przy użyciu określonej skali. Pierwszy etap polega na wyborze przez osobę badaną skali, spośród wymienionych sześciu, zestawionych w pary. Część tę przeprowadza się w celu porównania ich ze sobą i wyliczeniu wagi, jaką ma dana kategoria względem odczuwanego obciążenia. Badany zaznacza, która ze skal była dla niego bardziej odczuwalna w trakcie wykonywania zadania. Następnie, w drugim etapie badania (Rys. 4.2), przeprowadzana jest ocena każdej z sześciu kategorii, na dwubiegunowej, 20-stopniowej skali.

OCENA POZIOMU OBCIĄŻENIA ZADANIOWEGO

Jak silne było obciążenie umysłowe podczas wykonywania zadania ?



bardzo słabe **OBCIĄŻENIE UMYSŁOWE** bardzo silne

Jak duże było obciążenie fizyczne podczas wykonywania zadania ?



bardzo małe **OBCIĄŻENIE FIZYCZNE** bardzo duże

Jak dużego pośpiechu wymagało wykonywanie zadania ?



bardzo małego **PRESJA CZASU** bardzo dużego

Jak bardzo usatysfakcjonowany/a jesteś z wykonanego przez siebie zadania ?



w dużym stopniu **WYDOLNOŚĆ** w niewielkim stopniu

Jak ciężko musiałeś/aś pracować, aby wykonać zadanie na takim poziomie ?



niezbyt ciężko **WYSIŁEK** bardzo ciężko

Jak bardzo w czasie zadania czuleś/aś się niepewny, rozczłoseczony lub znudzony ?



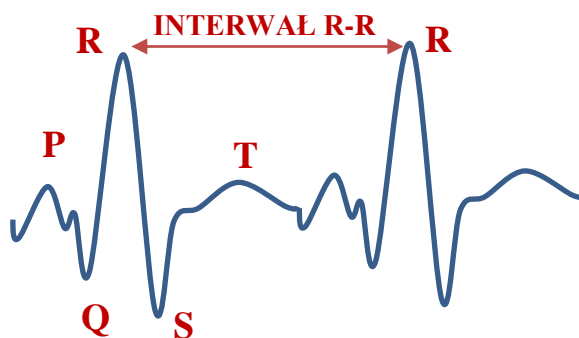
w niewielkim stopniu **FRUSTRACJA** w dużym stopniu

Rys. 4.1. Przykład kwestionariusza NASA TLX – etap drugi [70]

Na końcach skali znajdują się określone wielkości: bardzo słabe/bardzo silne, bardzo małe/bardzo duże, niezbyt ciężko/bardzo ciężko (Rys. 4.1). Na końcową ocenę pierwszego etapu badania sumuje się ile razy dana kategoria została wskazana przez badanego. Ocenę z drugiego zadania wyznacza się poprzez iloczyn sumy ważonej przez wyniki z poprzedniego etapu [8]. Metody subiektywne cechują przede wszystkim małe koszty ich przeprowadzenia oraz łatwość wykonania. Umożliwiają również badanie wielu różnych parametrów jednocześnie. Wadami przedstawionych metod jest uzyskiwanie wyników na podstawie własnych odczuć osoby badanej. Metody te są wrażliwe na oszustwa, poprzez częstą chęć badanego do pokazania siebie, jako lepszej wersji. Może to znacząco wpłynąć na wiarygodność pomiarów.

Drugim rodzajem omawianych metod są metody obiektywne oparte na pomiarach wykonywanych przy użyciu specjalistycznej aparatury badawczej, dające empiryczne dane, dotyczące określonych parametrów charakteryzujących stan psychofizyczny człowieka. Do metod tych zalicza się m.in. badania: pracy układu sercowo-naczyniowego, pracy układu oddechowego, pomiaru aktywności fal mózgowych, pomiaru ruchów gałki ocznej, reakcji skórno-galwanicznej oraz badania koordynacji wzrokowo-ruchowej [32].

Pierwszą z metod oceny jest analiza pracy układu sercowo-naczyniowego. W obszarze tym można wykonywać pomiary takich parametrów jak: rytm serca HR (ang. *heart rate*), ciśnienie krwi, interwały pomiędzy poszczególnymi uderzeniami serca IBI (ang. *interbeat interval*), zmienność rytmu serca HRV (ang. *heart rate variability*). Według aktualnych badań pomiary częstotliwości rytmu serca HRV są najlepszą metodą (z zakresu pracy układu sercowo-naczyniowego) do analizy stanu psychofizycznego człowieka, ze względu na wrażliwość parametru na działanie układu przywspółczulnego [3, 62, 68, 130]. Większa zmienność rytmu serca oznacza działanie układu przywspółczulnego, który odpowiada za spowolnienie reakcji organizmu, co wiąże się z ogólnym poczuciem relaksacji i stanu odpoczynku badanego [57]. HRV wyraża się uchwytymi, np. w badaniu elektrokardiograficznym EKG, różnicami odstępów pomiędzy szczytami załamków R tzw. interwałami R-R lub interwałami IBI (Rys. 4.2), w następujących kolejno po sobie zespołach QRS pochodzenia zatokowego. Zespoły QRS opisują pobudzenie mięśni komórek serca i składają się z jednego lub kilku załamków określanych kolejno jako Q, R i S, w zależności od miejsca wystąpienia i kierunku wychylenia [43].



Rys. 4.2. Przykładowy załamek QRS z oznaczeniem interwału R-R [opracowanie własne]

Analizy częstotliwości rytmu serca można dokonywać za pomocą czterech metod: Analizy czasowej, analizy częstotliwościowej, analizy czasowo-częstotliwościowej oraz metod nieliniowych [99]. Ocena HRV przeprowadzona za pomocą analizy czasowej polega na wykorzystaniu metod statystycznych w celu wyznaczenia poszczególnych parametrów opisujących zmienność rytmu zatokowego [101]. W metodzie częstotliwościowej wykorzystuje się widma fal powstałych w pomiarze EKG. Jest to metoda wymagająca najdłuższej, pod względem czasowym, rejestracji, aby uzyskać wiarygodność. Ocena przy użyciu metody czasowo-częstotliwościowej oparta jest natomiast na analizie falkowej (ang. *wavelet*), do której niezbędne jest opracowanie empirycznego modelu obliczeniowego.

Ostatnią z metod jest analiza nieliniowa. W tym przypadku poszczególne parametry wyznaczane są na podstawie wykresów Poincare, które przedstawiają zmianę długości każdego kolejnego interwału R-R, względem poprzedzającego. Parametry odczytuje się na podstawie linii identyczności. Najbardziej popularnymi metodami są metoda statystyczna oraz częstotliwościowa. Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że zmienność rytmu serca odzwierciedla stan zdrowia fizycznego i zdolność organizmu do radzenia sobie w sytuacjach stresowych [7]. Badania pokazują również, że zmienność rytmu serca jest parametrem najlepiej oceniającym stan psychofizyczny człowieka, ze względu na bezpośredni związek między układem współczulnym i przywspółczulnym [3, 57, 62, 68, 130]. W ostatnich latach obserwuje się rozwój parametru HRV jako podstawy systemów bezpieczeństwa [107]. Na podstawie HRV aktywność autonomicznego układu nerwowego można mierzyć nieinwazyjnie, a sygnał ten pokazuje zmiany podczas epizodów stresu, skrajnego zmęczenia lub senności [124]. Istnieją badania dotyczące np. systemów wspomagania kierowcy opartych na parametrze HRV oraz wiele innych opisujących pracę układu sercowo-naczyniowego nie tylko u pilotów, ale również u operatorów BSP [12, 13, 26, 63-65, 85, 91, 125, 131]. Wyniki badań grup badawczych z Niemiec pokazują, że rejestracja EKG jest możliwa nawet bez samoprzylepnych elektrod. Dzięki temu sygnał HRV jest łatwo dostępny dla zaawansowanych systemów wspierających operatorów transportowych [26]. Badania nad wdrażaniem metod analizy HRV do systemów bezpieczeństwa dotyczą głównie pojazdów samochodowych i kierowców. Przeprowadzono również badania dotyczące zmienności HRV u pilotów statków powietrznych podczas operacji lotniczych w warunkach rzeczywistych lub symulacyjnych [12, 13]. Badania te skupiają się głównie na wpływie obciążenia zadaniami na zmiany parametru HRV [103]. Wyniki jednego z badań pokazały, że w rozważanych badaniach lotniczych nie jest możliwe oszacowanie poziomu obciążenia pilotów wyłącznie za pomocą subiektywnych pomiarów i konieczne jest wykorzystanie również metod obiektywnych. Ponadto wyniki wykazały możliwość i zalety pomiarów obciążenia pracą w oparciu o HRV podczas lotu przy użyciu czujników biometrycznych, które można zintegrować ze środowiskiem kokpitu [2]. Analizy wykonywane przez badaczy wyraźnie wskazują, że analiza HRV może być wykorzystywana do oceny obciążenia zadaniowego pilotów nawet w rzeczywistych warunkach. Potwierdzają również fakt, że wraz ze zwiększeniem obciążenia pilota zadaniami parametry określające HRV maleją [14, 63-65, 72]. Ponadto jedno z badań wykazało, że długość interwałów RR jest krótsza

podczas operacji lotniczych w porównaniu z ich długością w spoczynku [104]. Wyniki badań przeprowadzonych w ramach oceny stanu psychofizycznego pilota podczas operacji lotniczej sugerują, że urządzenia EKG mogą być instalowane w kokpitach statków powietrznych jako dodatkowe źródło informacji do analizy wypadków lub jako element obiektywnej oceny ucznia-pilota podczas szkolenia [97]. Może to pozytywnie wpłynąć na interakcje człowiek-maszyna oraz bezpieczeństwo lotnicze. Pomiar pracy układu sercowo-naczyniowego charakteryzuje się łatwością wykonania oraz występowaniem szerokiego wyboru urządzeń pomiarowych umożliwiających przeprowadzenie tego typu badania. Jest to nieinwazyjna metoda, która bardzo dobrze sprawdza się w badaniu obciążenia zadaniowego oraz analizach stanu psychofizycznego operatorów w systemach opartych na interakcji człowiek-maszyna.

Kolejną metodą jest pomiar elektroencefalograficzny, czyli aktywności fal mózgowych. Elektroencefalografia EEG (ang. *electroencefalography*) jest nieinwazyjną metodą neuroobrazowania, służącą do badania bioelektrycznej czynności mózgu, za pomocą elektroencefalografu. Elektroencefalogram definiuje się jako aktywność elektryczną typu zmiennego, rejestrowaną z powierzchni skóry głowy za pomocą przyklejonych do niej elektrod i mediów przewodzących. EEG jest wykorzystywane do rozumienia funkcjonowania poznawczego człowieka, są to takie aspekty, jak pamięć, emocje, percepcja oraz kontrola [19]. Mózg jest zbudowany z różnych obszarów. Aktywność elektryczna jest przejawem reakcji mózgu na bodźce [19]. W zależności od stanu psychofizycznego osoby badanej grupy neuronów, wewnątrz ludzkiego mózgu, synchronizują się, a ich aktywność przejawia się w formie zmienności elektrycznej, rejestrowanej na skórze głowy [39]. Każdy z nich odpowiada za inne funkcje poznawcze, dlatego elektrody umieszcza się na skórze głowy w określony sposób, zgodnie z normą 10-20 [44]. Pozwala to na jednorodność przeprowadzanych badań. W celu rejestracji potencjału między poszczególnymi punktami skóry głowy, potrzebne są minimum dwie elektrody, aby uzyskać optymalny zapis. Wykorzystuje się zazwyczaj więcej elektrod, umieszczonych w odpowiednich miejscach na skórze głowy. Liczba użytych elektrod zależy głównie od rodzaju przeprowadzanego badania. Urządzenia, służące do pomiaru EEG mogą posiadać od 1 do 256 elektrod [39]. Duża liczba elektrod wymagana jest do celów klinicznych, natomiast do przeprowadzania badań eksperymentalnych zazwyczaj wykorzystuje się mniej inwazyjną aparaturę, która nie wymaga długiego przygotowania i pozbawiona jest dużej liczby przewodów, które w badaniu klinicznym występują. Obecnie na rynku występuje wiele urządzeń bezprzewodowych, które znacznie ułatwiają pomiar elektroencefalograficzny oraz nie ingerują w ergonomiczność stanowiska oraz efektywność badanego np. operatora [6]. Są to m.in. takie urządzenia jak Emotiv, Mindwave Mobile czy Muse S. Sygnał EEG obrazowany jest za pomocą domeny częstotliwości. Różne częstotliwości łączone są ze sobą, w celu uzyskania informacji o stanie psychofizycznym osoby badanej. Część sygnału pochodzi z oscylacji od 1 Hz do 40 Hz, a niektóre z nich osiągają wartości powyżej 100 Hz. Szeroki zakres częstotliwości podzielony jest na fale alfa, beta, gamma, delta oraz theta. [73]. Podsumowując im większa częstotliwość (gęstość) sygnału EEG tym większe obciążenie poznawcze. Badania naukowe wykazują, że przy zastosowaniu nieinwazyjnej aparatury badawczej metoda EEG może być

z powodzeniem wykorzystywana w trakcie pomiarów np. operatora w układzie M-T-E (ang. *man-technology-environment*) [19, 39].

Metoda oceny stanu psychofizycznego może być również oparta na pomiarze zmiany właściwości elektrycznych skóry GSR (ang. *Galvanic Skin Response*). Sygnał zmiany właściwości elektrycznych skóry może być używany do uchwycenia odpowiedzi autonomicznego układu nerwowego, jak parametru funkcji gruczołów potowych [98]. GSR inaczej nazywane jest również odruchem psychogalwanicznym PGR (ang. *psychogalvanic reflex*). Odruch ten powstaje w wyniku stymulacji organizmu bodźcem, wywołującym reakcję emocjonalną, która prowadzi do pobudzenia czujności człowieka. Odpowiedzią organizmu jest zwiększenie przewodności elektrycznej skóry, które może być wykorzystywane w badaniu stanu psychofizycznego [53, 74, 75]. Metoda ta jest z powodzeniem wykorzystywana również w rozpoznawaniu stanów stresowych oraz obciążenia poznawczego [53]. W jednych z badań [128] dokonano analizy kilku parametrów fizjologicznych podczas różnych faz operacji lotniczej. Stwierdzono zwiększenie odpowiedzi skórno-galwanicznej podczas fazy startu oraz lądowania. Przedstawione badania wskazują na możliwość użycia odpowiedzi skórno-galwanicznej skóry w celu oceny stanu psychofizycznego np. pilota. Metoda ta jest nieinwazyjna, jednak dostępne na rynku urządzenia w znaczący sposób ingerują w ergonomię stanowiska operatora oraz mogą utrudniać wykonywanie podstawowych czynności, ze względu na przewodowe działanie oraz aparaturę założoną na np. rękę osoby badanej.

Kolejną, omawianą w ramach rozprawy metodą, należąca do grupy obiektywnych jest technika okulograficzna. Okulografia (*eye tracking*) jest badaniem, polegającym na śledzeniu ruchu gałek ocznych [105]. Śledzenie odbywa się przy użyciu specjalnie zaprojektowanej kamery. Eye tracking umożliwia rozpoznanie, gdzie i w jaki sposób skierowane jest spojrzenie osoby badanej [105]. Do badania okulograficznego mogą być wykorzystywane eye trackery stacjonarne lub mobilne [27, 126]. Aparatura stacjonarna może mieć zastosowanie np. podczas badania osoby znajdującej się przed ekranem komputera, wówczas eye tracker ma postać podłużnej listwy i znajduje się pod lub nad ekranem komputera. Jest to aparatura badawcza, która w przypadku bardziej zaawansowanego stanowiska pracy może ingerować w jego ergonomię. Okulografy mobilne najczęściej występują w postaci okularów. Są to urządzenia nieinwazyjne i mogą być stosowane praktycznie w każdym środowisku. Aparatura, służąca do śledzenia ruchu gałek ocznych wykorzystuje technikę podczerwieni oraz kamerę lub zestaw kamer [28, 33]. Światło podczerwone, kierowane jest na źrenicę w ludzkim oku i odbija się od narządu wzroku, tworząc obraz na jego rogówce. Przy użyciu kamery rejestrowane jest położenie punktu odbicia światła od powierzchni rogówki. Pomiar wykonywany jest względem środka źrenicy [27, 126]. Parametry opisujące ruch gałki ocznej można podzielić na te wyrażane liczbowo oraz graficznie. Miary liczbowe to fiksacje i sakady. Sakady to nagłe ruchy oka, które występują pomiędzy fiksacjami. Zazwyczaj trwają od 30 do 80 ms [4]. Fiksacja to trwająca krótką chwilę stabilizacja gałki ocznej. W trakcie trwania fiksacji narząd wzroku jest nieruchomy. Czas trwania fiksacji to od około 200 do 300 ms [21, 40, 84]. Do graficznych metod przedstawiających ruch gałek ocznych należą mapy cieplne

(ang. *heat maps*), ścieżki skanowania wzrokiem (ang. *gaze plots*) oraz obszary zainteresowania AOI (ang. *areas of interest*). Mapy ciepłe przedstawiają elementy danego obrazu, na które skierowane było spojrzenie badanego. Są one generowane na podstawie miary liczbowej, którą są fiksacje. Mapy tworzone są zazwyczaj przy użyciu kolorów, gdzie czerwony oznacza element, na którym osoba badana najdłużej skupiała swój wzrok, a kolorem żółtym i zielonym strefy krótszego czasu fiksacji. Kolejną graficzną metodą przedstawienia wyników badania eye tracker'em są ścieżki skanowania wzrokiem. Ścieżka przedstawia kolejność postrzegania przez badanego poszczególnych elementów obrazu. Ostatnią z miar liczbowych są obszary zainteresowania AOI. Są to obszary indywidualnie wybierane przez osobę dokonującą analizy wykonanego pomiaru. Wybór obszaru zainteresowań służy głównie analizom statystycznym, a wyniki podawane są w wartościach procentowych [27]. Technika okulograficzna ma zastosowanie w medycynie, głównie psychologii, w marketingu oraz badaniach związanych z interakcją człowieka z komputerem lub maszyną. Badanie przy użyciu eye tracker'a można z powodzeniem wykorzystywać w badaniach naukowych, dotyczących lotnictwa. Badania te są w stanie różnicować sposób postrzegania osób doświadczonych i nowicjuszy oraz osób poddanych np. deficytowi snu [56, 67].

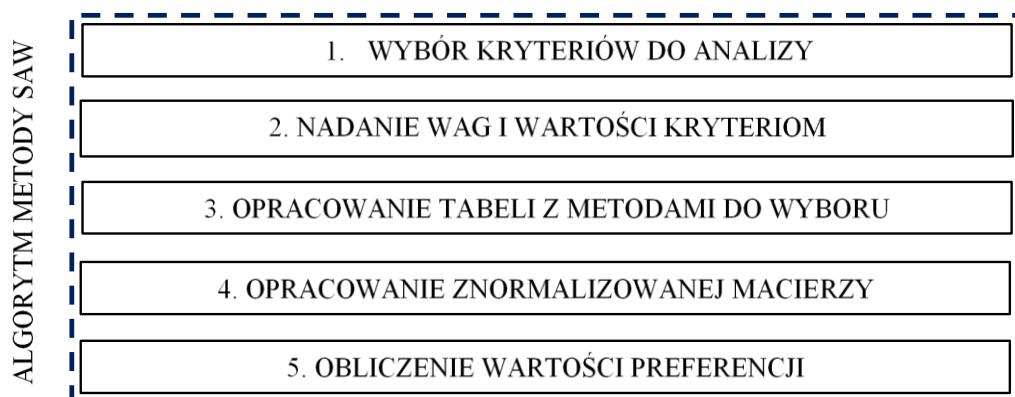
Metody behawioralne wywodzą się z dziedziny psychologii, którą jest behawiorystyka. W rozumieniu nauki psychologii behawiorizm polega na badaniu zachowania ludzkiego na skutek działania różnych bodźców. W przypadku oceny stanu psychofizycznego człowieka metody behawioralne polegają na łączeniu zagadnień psychologii z metodami inżynierskim [33]. Metody obiektywne, opisane w niniejszym rozdziale odnajdują zastosowanie właśnie w metodach behawioralnych, dlatego pomimo zaliczania ich do metod obiektywnych postanowiono wyróżnić je w niniejszym rozdziale. W jednych z badań ustalono, że zwiększenie przeciążenia zadaniowego osoby badanej wiąże się głównie ze zmniejszoną częstotliwością ruchów narządu wzroku. W badaniach [33] analizowano sposób monitorowania oraz wykonania lotów przez pilotów na wysoce zautomatyzowanych kokpitach komercyjnych statków powietrznych. Przebadano 20 pilotów linii lotniczych, na co dzień wykonujących operacje lotnicze na samolotach typu Boeing 747-400. Każdy z badanych wykonywał godzinny scenariusz, obejmujący trudne zdarzenia związane z automatyzacją kokpitu. Badania zostały przeprowadzone na symulatorze lotu przy użyciu aparatury śledzącej ruch gałek ocznych. Wyniki przeprowadzonych badań [96] potwierdzają, że piloci monitorują podstawowe parametry lotu w znacznie większym stopniu niż wizualne wskazania systemów automatycznych. Często nie sprawdzają wybranego trybu lub nie zauważają jego automatycznych zmian. Nie rozumieją komunikatów systemów automatycznych, przez co często nie wiedzą jaki wpływ dany komunikat będzie miał na zachowanie statku powietrznego. Brak dostatecznych obserwacji oraz zrozumienia systemów automatycznych przez pilotów to podstawowe problemy, które udało się wykazać badaczom. Jest to jeden z przykładów w jaki sposób można wykorzystać wskazane metody w zagadnieniach dotyczących stanu psychofizycznego pilota. Zastosowanie metod behawioralnych umożliwia przeprowadzanie licznych badań nad reakcjami pilotów oraz operatorów w lotnictwie.

4.3. Wielokryterialny dobór metod do dalszych badań

W celu dobrania odpowiednich metod, potrzebnych do przeprowadzenia badań eksperymentalnych i w konsekwencji opracowania autorskiej metody oceny stanu psychofizycznego kandydata postanowiono wykorzystać metodę wielokryterialnego doboru. Wspomaganie podejmowania decyzji, przy użyciu metod wielokryterialnego doboru ma na celu doprowadzenie do rozwiązania problemu decyzyjnego [129]. Metody wielokryterialne odnoszą się do preferencji pomiędzy poszczególnymi kryteriami. Preferencje te wyrażane są w postaci wag danych kryteriów oraz relacji zachodzących pomiędzy nimi.

Na podstawie analizy źródeł literaturowych wśród wielokryterialnych metod wspomagania decyzji można wyróżnić m.in. [37, 52, 109, 129]: metody addytywne, metody analitycznej hierarchizacji, metody interaktywne oraz metody punktów referencyjnych.

W celu przeprowadzenia wielokryterialnego doboru metod do badań, w niniejszym rozdziale wykorzystano jedną z metod addytywnych, SAW (ang. *Simple Additive Weighting Method*). Jest to jedna z najczęściej używanych [127] oraz jedna z prostszych dyskretnych metod wielokryterialnego doboru. W modelowaniu preferencji wykorzystywana jest funkcja liniowa, a metoda polega na przygotowaniu macierzy znormalizowanych ocen. W kolejnym kroku następuje wybór wariantu decyzyjnego, dla którego uzyskana została największa suma ocen [52, 109]. Algorytm postępowania przy metodzie SAW przedstawiono na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Schemat przeprowadzania wielokryterialnego wspomagania decyzji metodą SAW [opracowanie własne na podstawie 37]

Pierwszym krokiem w metodzie jest dobór kryteriów. W przypadku doboru metod do przeprowadzenia badań określono następujące kryteria:

- koszt zakupu aparatury,
- poziom analiz,
- ciągłość pomiaru,
- mobilność urządzenia,
- forma wyników,
- ergonomiczność urządzenia.

Charakterystykę poszczególnych kryteriów oraz odpowiadające im wartości i wagi przedstawiono w tabeli 4.2. Za kryteria najważniejsze uznano mobilność urządzenia pomiarowego i ciągłość pomiaru. Są to cechy bardzo istotne ze względu na specyfikę badań nad stanem psychofizycznym człowieka. Urządzenia mobilne umożliwiają wykonanie pomiaru w praktycznie każdym środowisku, bez ingerencji w stanowisko operatora oraz przede wszystkim bez elementów ograniczających ruch osoby badanej. Są to urządzenia, które umożliwiają funkcjonowanie osoby badanej, w danym środowisku, bez zakłóceń w wykonywaniu poszczególnych czynności. Ciągłość pomiaru zapewnia natomiast wyniki pomiarów odniesione do każdego momentu badania. Można wówczas odnosić uzyskane wartości do krytycznych momentów pomiaru, występujących sytuacji awaryjnych np. w trakcie operacji lotniczej oraz momentów referencyjnych, czyli pomiarów w trakcie spoczynku. Kolejnymi istotnymi kryteriami są: rodzaj wyników oraz inwazyjność urządzenia.

Tabela 4.2. Opracowane kryteria i odpowiadające im wagi zastosowane w analizie przy użyciu metody SAW

Nazwa kryterium	Charakterystyka	Wartość kryterium	Waga (c_i)
Koszt aparatury (K_1)	duży (powyżej 100 tys. zł)	1	10%
	średni (od 50 tys. do 99 999 tys. zł)	2	
	mały (poniżej 50 tys. zł)	3	
Ciągłość pomiaru (K_2)	pomiar punktowy (np. przed badaniem, raz w trakcie badania, po badaniu)	1	20%
	pomiar wykonywany w trakcie trwania całego badania	2	
	ciągłe monitorowanie pomiaru	3	
Mobilność urządzenia (K_3)	brak mobilności	1	30%
	częściowa mobilność	2	
	pełna mobilność	3	
Rodzaj wyników (K_4)	ilościowe, brak zależności od czasu badania	1	15%
	ilościowe, zależne od czasu badania	2	
	ilościowe, zależne od czasu badania, możliwa interpretacja graficzna	3	
Inwazyjność urządzenia (K_5)	inwazyjne	1	15%
	wymaga pewnego dostosowania badanego środowiska	2	
	nieinwazyjne	3	
Poziom analiz (K_6)	podstawowy	1	10%
	średniozaawansowany	2	
	zaawansowany	3	

W przypadku analiz, dotyczących stanu psychofizycznego człowieka, ważne jest aby wyniki były przedstawiane w sposób ilościowy oraz zależny od czasu. Dzięki takiemu rodzajowi wyników można z łatwością przeprowadzać analizy empiryczne i wyznaczać niezbędne parametry charakteryzujące stan osoby badanej w danym momencie. Całkowita nieinwazyjność urządzenia umożliwia wykonanie pomiaru bez ingerencji w organizm człowieka, środowisko pracy oraz ergonomię stanowiska, na którym wykonywane są czynności przez osobę badaną.

Ostatnimi, analizowanymi kryteriami są koszty aparatury i przeprowadzenia badania oraz poziom analiz, który powinien umożliwić łatwą interpretację wyników oraz późniejsze wdrożenie w niezbędnym oprogramowaniu. Jednocześnie analiza powinna być na tyle zaawansowana by umożliwić tworzenie własnych, nowatorskich aplikacji, opartych na uzyskanych wynikach. Koszty aparatury uznano za istotne w analizach kryterium. Wagowo przyporządkowano im 10%. Założono, że poniesione koszty, względem korzyści, jakie mogą płynąć z potencjalnych badań są elementem składowym i wartością konieczną do poniesienia, w przypadku przeprowadzania oceny stany psychofizycznego człowieka, dlatego przypisana do kryterium waga jest niewielka.

Kolejnym krokiem jest opracowanie tabeli zawierającej wartości poszczególnych kryteriów, przypisane do analizowanych metod (Tab. 4.3). Każdej z metod przyporządkowano odpowiednie wartości (od 1 do 3) w każdym z kryteriów.

Tabela 4.3. Wartości kryteriów przypisane do danych metod

Rodzaj metody	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
Metody oceny niezawodności człowieka (V ₁)	3	1	3	1	3	2
Metody subiektywne (V ₂)	3	1	3	1	3	2
Metody obiektywne (V ₃)	1	3	3	3	3	2
Metody behawioralne (V ₄)	2	2	3	1	3	2

Metoda SAW wymaga opracowania znormalizowanej macierzy, w skali, która umożliwi porównanie wszystkich rozważanych metod. Normalizacja przeprowadzana jest zgodnie ze wzorami (7) i (8), gdzie wskanik i oznacza metodę, a wskaźnik j dane kryterium [88, 89]:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (7)$$

$$r_{ij} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (8)$$

Formuły (7) używa się, jeśli dane kryterium odnosi się do korzyści, natomiast formuły (8), jeśli dane kryterium charakteryzuje koszty. Na przykład dla kryterium korzyści znormalizowana wartość (r_{ij}) otrzymywana jest poprzez obliczenie ilorazu wartości poszczególnego kryterium dla danej metody (x_{ij}) i maksymalnej wartości danego kryterium spośród tych przypisanych do analizowanych metod.

Poniżej przedstawiono przykładowe obliczenia przeprowadzone w celu opracowania znormalizowanej macierzy, zgodnie ze wzorami (7) i (8).

$$r_{11} = \frac{\min(3,3,1,2)}{3} = 0,33$$

$$r_{13} = \frac{3}{\max(3,3,3,3)} = 1$$

$$r_{12} = \frac{1}{\max(1,1,3,2)} = 0,33$$

$$r_{14} = \frac{1}{\max(1,1,3,1)} = 0,33$$

Na podstawie dokonanych obliczeń opracowano macierz:

$$R = \begin{bmatrix} 0,33 & 0,33 & 1 & 0,33 & 1 & 1 \\ 0,33 & 0,33 & 1 & 0,33 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,5 & 0,67 & 1 & 0,33 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Ostatnim krokiem jest obliczenie wartości współczynnika V_i dla poszczególnych metod, zgodnie ze wzorem (10). Wzory (9) i (10) odpowiadają kolejno za wagę kryteriów oraz wartość danego wariantu [89]. Waga (w) obliczana jest na podstawie ilorazu wartości wagi (c_1) w danym kryterium i sumy wszystkich wag przypisanych do opracowanych kryteriów.

$$w = \frac{c_1}{c_1 + \dots + c_n} \quad (9)$$

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (10)$$

Wartość danego wariantu V_i obliczana jest na podstawie sumy iloczynów wagi (w) oraz wartości znormalizowanej (r_{ij}), pochodzącej z macierzy, dla danej metody (i) i danego kryterium (j).

$$V_1 = 0,1 \times 0,33 + 0,2 \times 0,33 + 0,3 \times 1 + 0,15 \times 0,33 + 0,15 \times 1 + 0,1 \times 1 = 0,698$$

$$V_2 = 0,1 \times 0,33 + 0,2 \times 0,33 + 0,3 \times 1 + 0,15 \times 0,33 + 0,15 \times 1 + 0,1 \times 1 = 0,698$$

$$V_3 = 0,1 \times 1 + 0,2 \times 1 + 0,3 \times 1 + 0,15 \times 1 + 0,15 \times 1 + 0,1 \times 1 = 1$$

$$V_4 = 0,1 \times 0,5 + 0,2 \times 0,67 + 0,3 \times 1 + 0,15 \times 0,33 + 0,15 \times 1 + 0,1 \times 1 = \mathbf{0,783}$$

Do dalszych analiz, na podstawie wielokryterialnego doboru metod wybrano metody zaliczane do obiektywnych (1) oraz behawioralnych (0,783). Kolejnym etapem jest powtórzenie wielokryterialnego doboru, przy użyciu metody addytywnej SAW, w celu wybrania preferowanej opcji i opracowania metodyki badawczej. Do przeprowadzenia analizy posłużą wcześniej opracowane kryteria oraz ich wartości i wagi (Tab. 4.2).

W tabeli 4.4. przedstawiono przypisane wartości poszczególnych kryteriów w dalszym doborze metod do badań.

Tabela 4.4. Wartości kryteriów przypisane do danych metod

Rodzaj metody	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
HRV (V_1)	3	3	3	3	3	2
EEG (V_2)	2	3	2	3	2	3
GSR (V_3)	3	1	1	1	2	2
Eye tracking (V_4)	1	2	2	3	2	3

Poniżej przedstawiono przykładowe obliczenia przeprowadzone w celu opracowania znormalizowanej macierzy, zgodnie ze wzorami (7) i (8).

$$R = \begin{bmatrix} 0,33 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,67 \\ 0,5 & 1 & 0,67 & 1 & 0,67 & 1 \\ 0,33 & 0,33 & 0,33 & 0,33 & 0,67 & 0,67 \\ 1 & 0,67 & 0,67 & 1 & 0,67 & 1 \end{bmatrix}$$

Ostatnim krokiem jest obliczenie wartości dla poszczególnych metod, zgodnie ze wzorem (10).

$$V_1 = 0,1 \times 0,33 + 0,2 \times 1 + 0,3 \times 1 + 0,15 \times 1 + 0,15 \times 1 + 0,1 \times 0,67 = \mathbf{0,90}$$

$$V_2 = 0,1 \times 0,5 + 0,2 \times 1 + 0,3 \times 0,67 + 0,15 \times 1 + 0,15 \times 0,67 + 0,1 \times 1 = \mathbf{0,80}$$

$$V_3 = 0,1 \times 0,33 + 0,2 \times 0,33 + 0,3 \times 0,33 + 0,15 \times 0,33 + 0,15 \times 0,67 + 0,1 \times 1 = 0,41$$

$$V_4 = 0,1 \times 1 + 0,2 \times 0,67 + 0,3 \times 0,67 + 0,15 \times 1 + 0,15 \times 0,67 + 0,1 \times 1 = \mathbf{0,78}$$

Na podstawie przeprowadzonego wielokryterialnego doboru metod do badań można stwierdzić, że pod względem przyjętych kryteriów, odpowiednimi metodami może być pomiar częstotliwości pracy serca HRV, pomiar elektroencefalograficzny EEG lub pomiar ruchu gałek ocznych. Według dokonanej analizy najlepiej dobraną metodą jest pomiar częstotliwości pracy serca. Metoda eye tracking'u oraz EEG uzyskały bardzo zbliżone wartości i również mogą być odpowiednie do przeprowadzenia badań nad stanem psychofizycznym operatora oraz pilota w podstawowych szkoleniach lotniczych. Analizując jednak wspomniane metody pod względem odzwierciedlania stanu psychofizycznego, zgodnie z przedstawionymi źródłami literaturowymi, najlepszą metodą, która charakteryzuje pracę autonomicznego układu nerwowego człowieka AUN jest pomiar parametrów, opisujących zmienność rytmu serca. Dodatkowo koszty aparatury są niewielkie, w porównaniu do np. do urządzeń wykonujących badanie ruchu gałki ocznej oraz są nieinwazyjne. Biorąc pod uwagę dokonaną analizę wielokryterialną, charakterystykę poszczególnych metod oceny stanu psychofizycznego oraz analizę źródeł literaturowych badania eksperymentalne postanowiono przeprowadzić przy użyciu parametrów zmienności pracy serca.

5. Badania stanu psychofizycznego ucznia-pilota oraz ucznia-operatora

5.1. Metodyka badań

Metodyka badawcza zostanie omówiona poprzez dokładne scharakteryzowanie grup badawczych, użytej aparatury oraz przebiegu badań. Badania przeprowadzone zostały w warunkach rzeczywistych, w trakcie dwóch rodzajów szkoleń. Szkolenia do licencji UAVO w warunkach widzialności VLOS, dla lotów ze scenariuszem NSTS-01 oraz w trakcie szkolenia lotniczego do licencji pilota turystycznego (PPL(A)). W ramach realizacji badań zebrano dwie grupy badawcze:

- 21 uczniów-operatorów, biorących udział w szkoleniu UAVO,
- 19 uczniów-pilotów, biorących udział w szkoleniu do licencji PPL(A) lub w szkoleniu zintegrowanym do licencji ATPL(A).

Każde z badań składało się z 3 etapów. Pierwszy etap obejmował wypełnienie przez osobę badaną kwestionariusza osobowego (Załącznik I). Drugi etap stanowił pomiar referencyjny, wykonywany w trakcie spoczynku ucznia-operatora lub ucznia-pilota. Ostatnim etapem były pomiary wykonywane w trakcie odbywania szkolenia przez kandydatów.

Charakterystyka grupy badawczej oraz przebieg badań uczniów-operatorów do świadectwa kwalifikacji UAVO

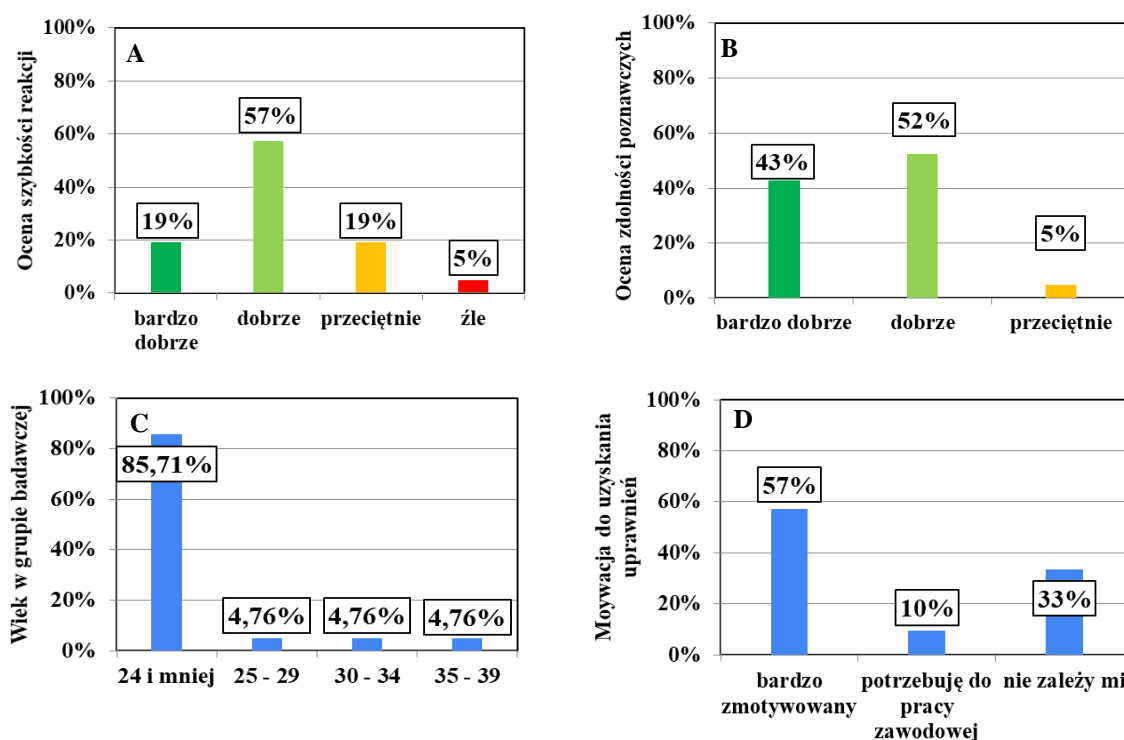
Charakterystyka grupy uczniów-operatorów zostanie omówiona na podstawie wyników zebranych przy użyciu kwestionariusza osobowego. Wśród badanych osób 95% z nich dotychczas nie posiadało żadnego doświadczenia lotniczego oraz uprawnień. Pozostałe 5% (1 osoba) posiadała licencję pilota zawodowego CPL(A). W badaniach na grupie uczniów-operatorów, istotnym aspektem jest umiejętność korzystania z transmitera, służącego do obsługi Bezzałogowego Statku Powietrznego, który swoją budową i funkcjami często przypomina kontrolery używane w różnego rodzaju grach komputerowych np. grach fabularnych typu RPG (ang. *role-playing-game*). Dodatkowo ważna jest również koordynacja wzrokowo-ruchowa oraz szybkość reakcji danej osoby. Biorąc pod uwagę powyższe w kwestionariuszu osobowym zawarto pytania dotyczące częstości grania w gry fabularne oraz oceny zdolności poznawczych. Zebrane dane przedstawione zostały na rysunku 5.1. Z pośród wszystkich badanych 62% osób gra w gry typu RPG, a tym 38% z nich z częstością 2 do 3 razy w miesiącu. Dodatkowo 57% respondentów korzysta z symulatorów lotu lub jazdy. Prawie 60% uczniów-operatorów ocenia swoją szybkość reakcji jako dobrą, 19% jako bardzo dobrą, 19% przeciętną, a 5% jako złą (Rys. 5.1. A). Swoje zdolności poznawcze (sposstrzeganie, uwaga, rozumowanie, pamięć) 52% badanych określiło jako dobre, 43% bardzo dobre i 5% przeciętne (Rys. 5.1. B). Największa liczba uczniów-pilotów (90%) należała do grupy wiekowej 24 lata i mniej, pozostałe osoby reprezentowały następujące grupy wiekowe: 35-39 lat (5%), 40-45 lat (5%), 46-49 lat (5%) (Rys. 5.1. C).

Na podstawie uzyskanych odpowiedzi można sformułować wnioski, dotyczące grupy uczniów-operatorów. Biorąc pod uwagę:

- korzystanie z gier fabularnych oraz symulatorów lotu lub jazdy kilka razy w tygodniu (ponad połowa badanych),
- ocenę szybkości reakcji jako dobrą,
- ocenę zdolności poznawczych jako bardzo dobre lub dobre,
- bardzo młody wiek uczniów,

badani nie powinni mieć problemów z korzystaniem z transmitera oraz koordynacją lotu w trakcie operowania BSP. Większość badanych w trakcie wykonywania praktycznej części szkolenia nie będzie odczuwała znacznego obciążenia zadaniem.

W kwestionariuszu uwzględniono również aspekt motywacji do uzyskania świadectwa kwalifikacji operatora Bezzałogowego Statku Powietrznego. Z pośród badanych 57% bardzo zależy na uzyskaniu świadectwa, 10% potrzebuje go do wykonywania swojej pracy zarobkowej, a 33% nie zależy na zdobyciu uprawnień (Rys. 5.1. D).



Rys. 5.1. Wyniki uzyskane na podstawie kwestionariusza osobowego dla uczniów-operatorów. Na rysunku przedstawiono: A) Ocenę szybkości reakcji, B) Ocenę zdolności poznawczych, C) Wiek osób badanych, D) Motywację do zdobycia świadectwa kwalifikacji [opracowanie własne]

Badanie uczniów-operatorów realizowane było podczas szkolenia praktycznego do świadectwa kwalifikacji UAVO. Ze względu na dynamiczny rozwój szkoleń do uprawnień operatora BSP oraz brak dostępu do rzetelnych danych nie podjęto próby obliczenia minimalnej liczebności grupy badawczej. Przede wszystkim ze względu na brak danych dotyczących wielkości populacji, jaką są uczniowie-operatorzy na terenie województwa wielkopolskiego. Szkolenie praktyczne obejmowało 4 godziny lotów

(zgodnie z Rozporządzeniem Komisji UE nr 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r.) na lotnisku Poznań-Kobylnica (EPPK). Ćwiczenia wykonywano na specjalnie przygotowanym terenie, składającym się z Helipad'u służącego do startów i lądowań, czterech drążków wyznaczających pole ćwiczeniowe oraz miejsca poszczególnych manewrów. Szkolenie każdego ucznia operatora zostało podzielone na dwa dni. Podczas lotów ćwiczono takie manewry jak: poziomy lot po obrysie kwadratu z zawisem nad każdym z drążków, lot płaski po obrysie kwadratu, lot BSP przodem do kierunku lotu, zwisy BSP w narożach przy zawrotach, loty po obrysie kwadratu ze zmianą kierunku BSP. Do wykonywania ćwiczeń szkoleniowych używano BSP producenta DJI, serii Phantom. Do pomiaru pracy układu sercowo-naczyniowego wykorzystano pas POLAR H10 (Rys. 5.2). Jest to sensor dokonujący pomiaru za pomocą dwóch elektrod. Urządzenie umożliwia pomiar parametrów charakteryzujących pracę układu sercowo-naczyniowego. W pomiarach skupiono się na wartościach interwałów R-R, potrzebnych do dalszych analiz.

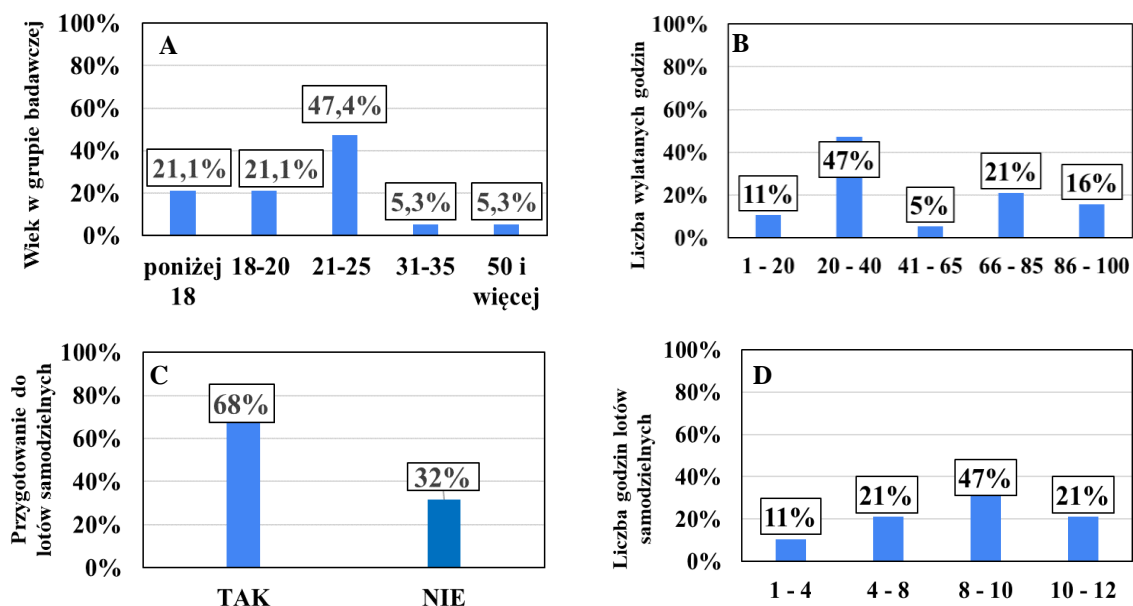


Rys. 5.2. Aparatura badawcza użyta do badań na uczniach-operatorach [opracowanie własne]

Urządzenie do wykonania pomiaru zostało wybrane ze względu na swoją prostotę i łatwość użytkowania. Jest to aparatura nieinwazyjna, która dodatkowo nie przeszkadzała w żaden sposób w funkcjonowaniu badanego podczas szkolenia. Jest też łatwa w obsłudze dzięki czemu ograniczono ryzyko niepowodzenia pomiaru. Jest to urządzenie, które potencjalnie mogłoby być używane przez instruktorów w trakcie szkolenia lotniczego. Dodatkowo tego typu pasy wykorzystywane są często w badaniach operatorów w systemach M-T-E w lotnictwie [12, 13, 104]. Dla każdej z badanych osób, pomiary składały się z trzech etapów. Pierwszym etapem było wypełnienie kwestionariusza osobowego, a drugim wykonanie pomiaru referencyjnego. Było to badanie wykonywane w warunkach spoczynku ucznia-operatora. Podczas tego pomiaru badany znajdował się w pozycji siedzącej i nie był poddany działaniu czynników, które mogłyby znacząco wpływać na stan psychofizyczny. Ostatnim etapem był pomiar porównawczy, czyli badanie wykonywane w warunkach trwania szkolenia. Podczas tego pomiaru uczeń-operator wykonywał ćwiczenia z zakresu praktycznej części szkolenia. Pomiar referencyjny trwał około 10 min, natomiast pomiar porównawczy od 60 do 90 min. Zebrane w ten sposób próbki można było wykorzystać do analiz.

Charakterystyka grupy badawczej oraz przebieg badań uczniów-pilotów do licencji PPL(A)

Charakterystyka grupy uczniów-pilotów również zostanie omówiona na podstawie wyników zebranych przy użyciu kwestionariusza osobowego. Wśród badanych osób 100% posiada status ucznia-pilota. Z pośród nich 19 osób, 63% stanowią uczniowie będący w trakcie szkolenia do licencji PPL(A), natomiast pozostałe 37% badanych to uczniowie realizujący proces zintegrowanego szkolenia lotniczego, prowadzonego przez Centrum Kształcenia Lotniczego CKL Politechniki Poznańskiej. Są to osoby przygotowywane do licencji ATPL(A), jednak przez cały proces szkolenia ich licencje mają status „zamrożony”, a oficjalny status badanych to uczeń-pilot. Wśród omawianych 37% uczniów pilotów: 21% posiada doświadczenie lotnicze w postaci od 61 do 85 h lotów, natomiast 16% (3 badanych) od 86 do 100 h (Rys. 5.3. B). Największa liczba uczniów-pilotów (47%) należała do grupy wiekowej od 21 do 25 lat (Rys. 5.3 A), pozostałe osoby reprezentowały następujące grupy wiekowe: poniżej 18 lat (21%), 18-20 lat (21%), 31-35 lat oraz 50 i więcej (po 5% badanych). W kwestionariuszu uwzględniono również aspekt przygotowania do lotów samodzielnych (Rys. 5.3. C). Przedstawione pytanie dotyczyło tego, czy uczniowie-piloci czują się dobrze do nich przygotowani – 68% badanych stwierdziło, że tak, natomiast 32% nie czuło się dobrze przygotowanymi do wykonywania takich lotów. Kolejne pytanie związane było z liczbą już wykonanych lotów samodzielnych – 68% uczniów-pilotów wykonało lub wykona od 8 do 10 h albo od 10 do 12 h lotów samodzielnych, co jest zgodne z obowiązującymi regulacjami prawnymi w zakresie przeprowadzania szkoleń lotniczych. Pozostałe 33% wykonało, bądź wykona od 1 do 4 h lotów samodzielnych lub od 4 do 8 h (Rys. 5.3. D).



Rys. 5.3. Wyniki uzyskane na podstawie kwestionariusza osobowego dla uczniów-pilotów. Na rysunku przedstawiono: A) Wiek w grupie badawczej, B) Liczba wylatanych godzin, C) Przygotowanie do lotów samodzielnych, D) Liczba godzin lotów samodzielnych

[opracowanie własne]

Dodatkowo w opracowanym kwestionariuszu zawarto pytanie, które dotyczyło utraty orientacji geograficznej w trakcie wykonywania lotów – 16% osób utraciło orientację geograficzną, natomiast pozostałym osobom nigdy się to nie zdarzyło.

Na podstawie uzyskanych odpowiedzi można sformułować wnioski, dotyczące grupy uczniów-pilotów. Biorąc pod uwagę:

- posiadane doświadczenie lotnicze (prawie 90% badanych wylatało 20 h lub więcej),
- posiadane doświadczenie w lotach samodzielnych (68% badanych wykonało 8 h lub więcej lotów samodzielnych),
- brak problemów z orientacją geograficzną u większości badanych,
- bardzo młody wiek uczniów,

zakłada się, że badani nie będą mieć problemów z prawidłowym wykonaniem ćwiczeń szkoleniowych. Większość uczniów-pilotów w trakcie wykonywania operacji lotniczej nie powinna odczuwać znaczącego stresu oraz dużego obciążenia zadaniem.

Badanie uczniów-pilotów realizowane było podczas lotów z instruktorami lub lotów samodzielnych każdej osoby z grupy badawczej. Loty odbywały się na lotnisku w Kąkolewie (EPPG), które jest siedzibą Centrum Kształcenia Lotniczego Politechniki Poznańskiej oraz na lotnisku Zielona Góra Przylep (EPZP), siedzibie Aeroklubu Ziemi Lubuskiej. Na Lotnisku EPPG zostało wykonanych 10 pomiarów (przebadano 10 uczniów-pilotów), natomiast na lotnisku EPZP 9 pomiarów (przebadano 9 uczniów-pilotów). Wszystkie pomiary dokonywane były w trakcie lotów na trasie, których wykonanie trwało około 1 h. Przyjęta liczebność grupy badawczej uczniów-pilotów jest zgodna z minimalną liczebnością próby dla populacji stanowiącej osoby ze statusem ucznia-pilota w województwie wielkopolskim oraz lubuskim. Minimalna liczebność próby określana jest następującym wzorem (11):

$$N_{min} = \frac{N_P \cdot (Z^2 \cdot f(1-f))}{N_P \cdot e^2 + Z^2 \cdot f(1-f)} \quad (11)$$

gdzie:

- N_{min} – minimalna liczebność próby,
- N_P – wielkość populacji, z której brana jest próba,
- Z – założony poziom ufności przedstawiony w rozkładzie normalnym, np. 1,64 dla 90% (90% pewności, że błąd w populacji nie przekroczy e),
- e – błąd oszacowania wyrażony w liczbie ułamkowej,
- f – wielkość frakcji, jeżeli nie jest znana wartości frakcji w populacji to należy podać wartość 0,5.

W celu obliczenia minimalnej liczebności próby wielkość populacji przyjęto, jako 214, co na podstawie danych otrzymanych z Inspektoratu Nadzoru i Certyfikacji, Departamentu Licencjonowania Personelu Lotniczego w ULC stanowi sumę osób ze statusem ucznia-pilota w województwach wielkopolskim i lubuskim, gdzie przeprowadzane były badania. Założony poziom ufności, odpowiadający poziomowi istotności 90%, równy jest 1,64. Błąd oszacowania przyjęto na poziomie 0,2, a wartość frakcji jako 0,5, ze względu na brak wiedzy dotyczącej jej wielkości.

Przyjęte założenia podstawiono do wzoru 11 i otrzymano minimalną liczebność próby, równą 15,58. Oznacza to, iż grupa badawcza składająca się z 19 uczniów-pilotów przy przedstawionych założeniach jest grupą reprezentatywną na obszarze lokalnym dwóch województw: wielkopolskiego oraz lubuskiego.

Do wykonywania lotów szkoleniowych używano zamiennie dwóch samolotów Cessna 172S Skyhawk, o rejestracji SP-UTD oraz SP-UTE, na lotnisku w Kąkolewie oraz samolotu Tecnam P2008, o rejestracji SP-KAZ, na lotnisku w Przylepie (Rys. 5.4). Wszystkie wspomniane samoloty posiadają czterocylindrowy silnik tłokowy.



Rys. 5.4. Flota wykorzystana do badań na uczniach-pilotach [opracowanie własne, 17]

Samolot Cessna 172S to jeden z najpopularniejszych samolotów szkoleniowych, wyposażony w awionikę Garmin G5 oraz Glass cockpit G1000NXi [16]. Samolot Tecnam P2008 wyposażony jest natomiast w awionikę Garmin G3X [17]. Do pomiaru pracy układu sercowo-naczyniowego, tak jak w przypadku poprzednich badań wykorzystano pas POLAR H10, a jego dokładna specyfikacja została przedstawiona na początku niniejszego rozdziału (Rys. 5.2).

Każdy z uczniów-pilotów brał udział w 3 etapach badania:

1. Wypełnienie kwestionariusza osobowego.
2. Wykonanie pomiaru w warunkach spoczynkowych (pomiar referencyjny), trwającego około 10 min.
3. Wykonanie pomiaru w trakcie wykonywania operacji lotniczej (pomiar porównawczy), trwającej około 1 h.

Podczas pomiaru referencyjnego badany znajdował się w pozycji siedzącej i nie był poddany działaniu żadnych bodźców zewnętrznych. Drugim etapem był pomiar porównawczy, czyli badanie wykonywane w warunkach trwania lotu szkoleniowego. Zebrane w ten sposób próbki można było wykorzystać do analiz.

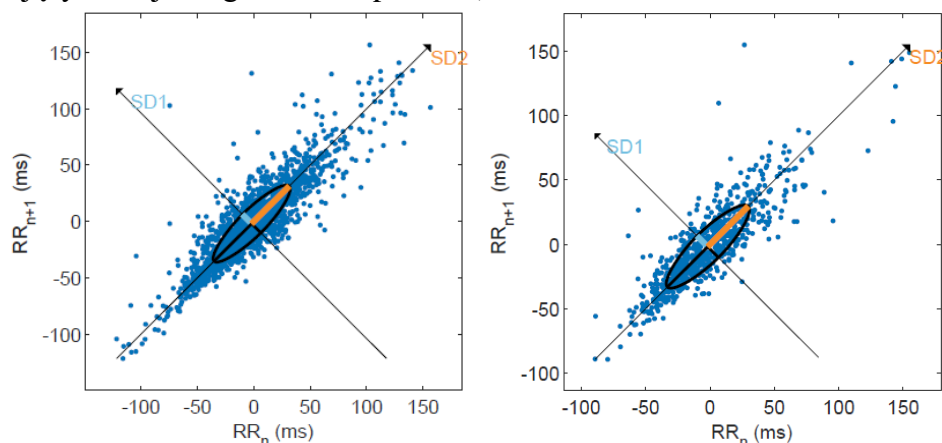
5.2. Analiza i wyniki badań dla obszaru szkolenia uczniów-operatorów do uprawnień UAVO

Jak uzasadniono w rozdziale 4.2. w badaniach skupiono się na pracy układu sercowo-naczyniowego, a dokładniej na częstotliwości pracy serca. Na podstawie wykonanych pomiarów do przeprowadzenia obliczeń postanowiono wykorzystać analizę czasową oraz nieliniową, które zostały omówione w rozdziale 4.2. Dane z wykonanych pomiarów poddano analizie przy użyciu oprogramowania,

dedykowanego do wyznaczania parametrów opisujących HRV. Pierwszym etapem analizy było usunięcie artefaktów z wykonanych pomiarów. Po ich usunięciu zapis z pomiaru nie przedstawia bezpośredniej długości interwałów R-R, a interwały N-N, czyli wartości uzyskane, po usunięciu tzw. szumów. Na podstawie tak przygotowanych próbek wyznaczono parametry częstotliwości pracy serca. Próbki wykorzystane w analizie miały długość 5 min, co jest zgodne z zasadami przeprowadzania analiz dotyczących krótkoterminowej zmienności pracy serca STV (ang. *short term variability*) [99]. Materiał dobierany był tak aby nie uwzględniał zapisów z początku (faza startu) oraz końca operacji (faza lądowania i kołowania), a następnie przy użyciu dedykowanego oprogramowania wyznaczono parametry odpowiednio dla analizy czasowej oraz nieliniowej. Dla jednej osoby badanej uzyskiwano parametry odpowiednio dla pomiaru referencyjnego (podczas spoczynku) oraz porównawczego (w trakcie szkolenia). W wyniku analiz wyznaczono, dla każdego ucznia-operatora, 10 zmiennych, odpowiednio dla pomiaru spoczynkowego i w trakcie wykonywania ćwiczeń szkoleniowych. W ramach analiz wyznaczono następujące zmienne:

- \bar{x} R-R – średnia długość interwału R-R [ms],
- \bar{x} HR – średnie tętno [bpm],
- HR max – tętno maksymalne [bpm],
- HR min – minimalne tętno [bpm],
- SDNN – odchylenie standardowe interwałów NN [ms],
- RMSSD – pierwiastek kwadratowy z sumy różnic pomiędzy poszczególnymi RR,
- HRVI – wskaźnik HRV [-],
- SD1 – parametr wyznaczony na podstawie wykresu Poincarè; jest to odchylenie standardowe prostopadłe do linii identyczności; wskaźnik ten charakteryzuje się tymczasową zmiennością [ms]; (przykładowy wykres Poincarè dla jednego z badanych przedstawiono na rysunku 5.5 [ms]),
- SD2 – parametr wyznaczony na podstawie wykresu Poincarè; jest to odchylenie standardowe wzdłuż linii identyczności; wskaźnik ten charakteryzuje długoterminową zmienność rytmu serca i odzwierciedla ogólną zmienność [ms],
- SD1/SD2 – stosunek parametrów SD1 i SD2 [-].

Oznacza to, że po analizie w dedykowanym oprogramowaniu, każdego badanego opisywało 10 zmiennych, w dwóch typach pomiarów (razem 20 zmiennych przypadających na jednego ucznia-operatora).



Rys. 5.5. Przykładowe wykresy Poincarè, dla uczniów-operatorów z zaznaczoną linią identyczności oraz parametrami SD1 i SD2

Przy użyciu wyznaczonych zmiennych przeprowadzono kolejny etap obliczeń, którym była analiza statystyczna. Wykorzystując oprogramowanie STATISTICA możliwe było wykonanie testów na normalność rozkładu w poszczególnych zmiennych oraz testów istotności. W celu sprawdzenia normalności rozkładów wykorzystano test Shapiro-Wilka. Wyniki uzyskanego testu były analizowane z poziomem istotności 0,05 (Tab. 5.1). Jak można zauważyć w tabeli 5.1. trzy zmienne nie charakteryzowały się rozkładem normalnym. Przeprowadzenie testów było niezbędne, aby prawidłowo dobrać rodzaj testów istotności. Dla zmiennych o rozkładzie normalnym zastosowano parametryczny test istotności – test t-Studenta, natomiast dla zmiennych, które nie charakteryzowały się rozkładem normalnym test nieparametryczny – Test Wilcoxon’a.

Tabela 5.1. Wyniki testu normalności rozkładu zmiennych w grupie uczniów-operatorów

Zmienna	Test Shapiro - Wilka	P-value	istotność	Test
\bar{x} RR	0,91301	0,06298	p>0,05	parametryczny
\bar{x} RR*	0,96103	0,53731	p>0,05	
\bar{x} HR	0,95959	0,50792	p>0,05	parametryczny
\bar{x} HR*	0,95766	0,47021	p>0,05	
SDNN	0,97111	0,75752	p>0,05	parametryczny
SDNN*	0,95476	0,41748	p>0,05	
RMSSD	0,72027	0,00005	p<0,05	nieparametryczny
RMSSD*	0,90712	0,04818	p<0,05	
HR max	0,95688	0,45555	p>0,05	parametryczny
HR max*	0,96687	0,66323	p>0,05	
HR min	0,92975	0,13609	p>0,05	parametryczny
HR min*	0,94175	0,23591	p>0,05	
HRVI	0,90828	0,05079	p>0,05	parametryczny
HRVI*	0,95707	0,45926	p>0,05	
SD1	0,72176	0,00005	p<0,05	nieparametryczny
SD1*	0,90643	0,04671	p<0,05	
SD2	0,95271	0,38289	p>0,05	parametryczny
SD2*	0,94891	0,32474	p>0,05	
SD1/SD2	0,51888	0,00000	p<0,05	nieparametryczny
SD1/SD2*	0,61448	0,00000	p<0,05	

*zmienne dla pomiaru referencyjnego

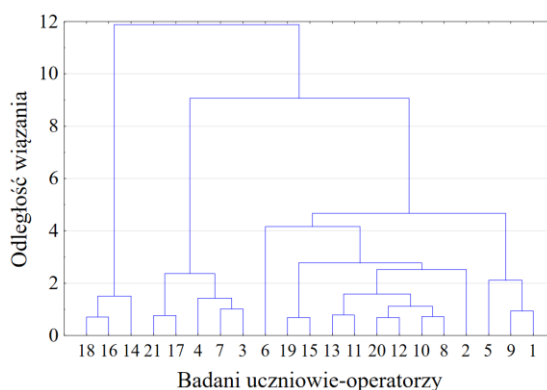
W tabeli 5.2. zebrano wyniki testów istotności przeprowadzonych dla poszczególnych zmiennych.

Tabela 5.2. Wyniki dla testów istotności w grupie uczniów-operatorów

Zmienna	Test t-Studenta	Test par Wilcoxon'a	p-value	istotność
\bar{x} RR	0,401452	–	0,692344	p>0,05
\bar{x} HR	1,66	–	0,112086	p>0,05
SDNN	2,814988	–	0,010696	p<0,05
RMSSD	–	1,338170	0,180842	p>0,05
HR max	3,081960	–	0,005880	p<0,05
HR min	8,309778	–	0,000451	p<0,05
HRVI	1,783498	–	0,089689	p>0,05
SD1	–	1,407685	0,049225	p<0,05
SD2	6,232571	–	0,001935	p<0,05
SD1/SD2	–	0,538744	0,590064	p>0,05

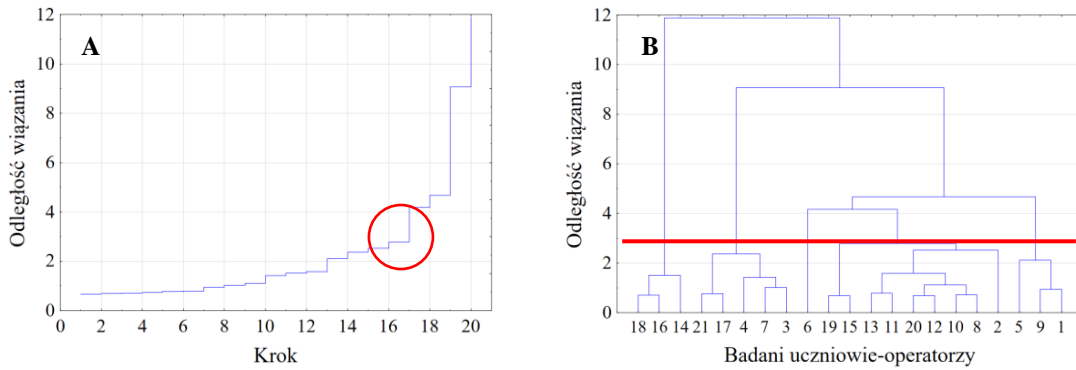
Na poziomie istotności 0,05 znaczące różnice pomiędzy pomiarem referencyjnym a porównawczym występowały dla 5 zmiennych: SDNN, HR max, HR min oraz parametrów SD1 i SD2.

Na podstawie przeprowadzonych wstępnych analiz statystycznych wyznaczono zmienne, które wykazują istotne różnice i mogą różnicować grupę badawczą (zmienne oznaczone pogrubieniem w tabeli 5.2). Kolejnym etapem obliczeń było przeprowadzenie analizy wielowymiarowej, która ma na celu ukazanie skupień (grup), powstałych w grupie badawczej i sprawdzenie, czy dane parametry były charakterystyczne, dla każdego z nich. Analiza skupień obejmuje kilka różnych algorytmów klasyfikacji. W ramach niniejszej rozprawy analiza ta została przeprowadzona celem organizacji zebranych danych i opracowania profili uczniów, opisujących dane skupienie. Pierwszym etapem tworzenia grup jest dobór odpowiedniego algorytmu, w tym metody aglomeracji. Wynikiem pierwszego etapu jest drzewo hierarchiczne, które dla zebranych danych przedstawiono na rysunku 5.6. Opracowane drzewo (Rys. 5.6) przedstawia proces łączenia wszystkich badanych w jedną grupę. Proces ten odbywa się na podstawie odległości wiązania pomiędzy poszczególnymi obiektami badawczymi. Im mniejsza odległość wiązania, tym bardziej podobne cechy charakteryzują połączonych uczniów. Cechy to zmienne opisujące badanych, czyli parametry wyznaczone we wcześniejszym etapie analiz (zmienne zaznaczone pogrubieniem w tabeli 5.2).



Rys. 5.6. Drzewo hierarchiczne dla grupy uczniów-operatorów

Kolejnym krokiem tworzenia skupień jest sprawdzenie, w którym miejscu nastąpiła pierwsza znacząca zmiana odległości pomiędzy poszczególnymi, utworzonymi strukturami. Na rysunku 5.7A. przedstawiono odległości dla poszczególnych kroków łączenia badanych, oraz miejsce (czerwona linia), w którym zdecydowano podzielić, utworzoną strukturę na poszczególne skupienia (Rys. 5.7B). Miejsce podziału dobrano na podstawie analizy odległości wiązania i wskazano (czerwony okrąg na rysunku 5.7A) pierwszą, największą zmianę pomiędzy jednym wiązaniem a kolejnym. Na rysunku 5.7A przedstawiono miejsce pierwszej, największej zmiany odległości wiązania, wynoszące 3, która wystąpiła w kroku 17 tworzonego drzewa. Oznacza to, że badani tworzący grupy o odległości wiązania mniejszej niż 3 są silniej powiązani i reprezentują podobne wartości poszczególnych istotnych zmiennych (oznaczone pogrubieniem w tabeli 5.2)



Rys. 5.7. A) Poszczególne kroki tworzenia struktur, B) utworzone drzewo hierarchiczne dla grupy uczniów-operatorów. Czerwonym okręgiem oraz linią zaznaczono miejsce tworzonych skupień [opracowanie własne]

Na podstawie wskazanej wartości podzielono drzewo hierarchiczne w miejscu, w którym odległość wyniosła wskazaną wartość 3 (Rys. 5.7B). W wyniku podziału otrzymano 5 skupień. Następnie dokonano ich oceny przy użyciu całkowitego wskaźnika sylwetkowego GSI, określanego wzorem 12 [9]. Obliczenie wskaźnika GSI jest konieczne w celu sprawdzenia poprawności wykonanej analizy wielowymiarowej.

$$GSI = \frac{1}{g} \sum_l^g S(S_l) \quad (12)$$

gdzie:

- GSI – całkowity indeks sylwetkowy,
- g – liczba wyodrębnionych w wyniku grupowania skupień, s_l – skupienie l -te, przy czym $l = 1, 2, \dots, g$,
- $S(s_l)$ – częściowy indeks sylwetkowy wyznaczony dla skupienia S_l .

Wyznaczenie częściowych indeksów sylwetkowych osobno dla każdego skupienia, wymaga zastosowania formuły (13) [9]:

$$S(S_l) = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} S(i), \quad S(i) = \frac{1}{n_l} \sum_{i \in S_l} \frac{b_i - a_i}{\max(a_i, b_i)}, \quad (13)$$

gdzie:

- $S(i)$ – częściowy indeks sylwetkowy, wyznaczony dla i -tego obiektu, przy czym $i = 1, 2, \dots, n_l$,
- n_l – liczba obiektów należących do l -tego skupienia.

Z kolei średnie wewnątrzgrupowe a_i oraz średnie międzygrupowe b_i to odpowiednio:

$$a_i = \frac{1}{n_l - 1} \sum_{\substack{i,j=1; \\ i \neq j; i,j \in S_l}}^{n_l} d_{ij} \quad b_i = \min_{i \in S_l} \min_{s_r \neq S_l} d_{i,s_r} \quad d_{i,s_r} = \frac{1}{n_r} \sum_{q=1; q \in S_r}^{n_r} d_{iq} \quad (14)$$

gdzie:

- d_{i,s_r} – odległość pomiędzy obiektem i -tym oraz skupieniem s_r , przy czym $i = 1, 2, \dots, g - 1$,
- d_{iq} – odległość pomiędzy obiektem i -tym oraz q -tym, przy czym $i \in sk$ oraz $q \in sr$.

Do analiz wykorzystywane są wartości odległości wiązania pomiędzy poszczególnymi badanymi, wyznaczone podczas opracowania drzewa hierarchicznego

i tworzenia grup. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zebrano w tabeli 5.3. Efektem obliczeń są wartości odległości pomiędzy poszczególnym badanym a danym skupieniem np. d_iS_1 oraz cząstkowe indeksy sylwetkowe S_i obliczone dla danego skupienia. Wykorzystując oszacowane indeksy uzyskiwany jest całkowity wskaźnik sylwetkowy GSI, który może przyjmować wartości z przedziału $[-1, 1]$.

Tabela 5.3. Wyniki analizy skupień przy użyciu całkowitego wskaźnika sylwetkowego GSI dla grupy uczniów-operatorów [opracowanie własne]

Skupienie	Badany	a_i	d_iS_1	d_iS_2	d_iS_3	d_iS_4	d_iS_5	b_i	$S_{(i)}$	$S_{(S_i)}$	GSI
S1	6	0,00		5,17	3,45	3,08	3,06	3,06	1,00	1,00	0,55
S2	14	1,31	4,88		2,18	4,72	2,88	2,18	0,40	0,58	
	16	1,03	5,03		3,08	5,08	3,01	3,01	0,66		
	18	0,99	5,60		3,26	5,40	3,43	3,26	0,70		
S3	1	1,53	3,79	2,72		3,43	2,45	2,45	0,38	0,38	
	5	1,53	2,37	3,50		2,98	2,08	2,08	0,26		
	9	0,94	3,65	2,30		3,34	1,90	1,90	0,50		
S4	3	1,10	2,75	4,79	2,89		2,09	2,09	0,47	0,48	
	4	1,53	3,33	4,59	3,16		2,13	2,13	0,28		
	7	1,60	2,17	4,97	3,34		2,18	2,17	0,26		
	17	1,30	3,37	5,67	3,60		3,02	3,02	0,57		
	21	1,47	3,79	5,32	3,27		2,92	2,92	0,50		
S5	2	1,93	4,32	3,92	3,38	2,71		2,71	0,29	0,30	
	8	1,30	2,28	3,69	1,96	1,79		1,79	0,28		
	10	1,04	2,56	3,04	1,81	2,36		1,81	0,43		
	11	1,25	3,11	3,34	1,88	1,90		1,88	0,34		
	12	1,16	2,53	3,59	2,45	1,95		1,95	0,40		
	13	1,48	3,34	2,83	1,27	2,50		1,27	-0,14		
	15	1,34	2,92	2,54	2,23	3,10		2,23	0,40		
	19	1,62	3,33	1,97	1,98	3,52		1,97	0,18		
	20	1,13	3,15	3,06	2,32	2,39		2,32	0,51		

Na podstawie cząstkowych indeksów sylwetkowych stwierdzono, iż grupę S2 oraz S4 cechuje największa wartość wskaźnika $S(S_i)$. Oznacza to, że te dwie struktury są najsilniej powiązane i uzyskały najbardziej zbliżone wartości zmiennych, które charakteryzują badanych (SDNN, SD1, SD2, SD1/SD2, HR min, HR max). Uczeń reprezentujący grupę S1 uzyskał wartości poszczególnych analizowanych zmiennych znacznie odległe od kandydatów w pozostałych strukturach (S2-S5), co wpłynęło na utworzenie jednoosobowego skupienia i wartość cząstkowego wskaźnika $S(S_i)$ równą 1. Grupy S3 i S5 nie są tak silnie powiązane jak grupy S2 i S4, jednak uzyskany całkowity wskaźnik GSI świadczy o prawidłowej strukturze grupowania. Do oceny grupowania stosowana jest następująca interpretacja dla określonych przedziałów wartości GSI [9]:

- $GSI > 0,70$ silna struktura uzyskanych grup,
- $0,70 \geq GSI > 0,50$ poprawna struktura grupowania,
- $0,50 \geq GSI > 0,25$ słaba struktura grupowania,
- $GSI \leq 0,25$ brak skupień w danym zbiorze.

W przypadku słabej struktury grupowania sugeruje się zastosowanie innej metody. Uzyskana wartość całkowitego wskaźnika sylwetkowego GSI równa 0,55 wskazuje na **poprawną strukturę grupowania**. Oznacza to, że tak przygotowane grupy badanych osób można wykorzystać w dalszej analizie danych. Na podstawie wyznaczonych skupień opracowano tabelę, w której zawarto wartości parametrów charakteryzujące każdego z badanych (Tab. 5.4). Parametr SDNN oznacza odchylenie standardowe od interwałów N-N, są to interwały R-R pozbawione artefaktów. Zgodnie z analizą literaturową im mniejsze odchylenia uzyskuje badany, tym występuje większe obciążenie danym zadaniem [12-14, 57, 62-65, 72, 99]. Wartość normalna parametru SDNN dla zdrowego człowieka, w warunkach spoczynkowych wynosi 50 ± 15 ms [99]. Analizując wyniki uzyskane z pomiarów w trakcie wykonywania ćwiczeń szkoleniowych, na podstawie obliczeń wykazano, że parametr SDNN trakcie szkolenia osiąga wartości 36 ± 10 ms. Kolejnymi analizowanymi parametrami są SD1 i SD2. Odchylenia te to deskryptory wyznaczane na podstawie wykresów Poincare (Rys. 5.5). Obydwa parametry odpowiadają odchyleniom standardowym, przy czym SD1 charakteryzuje rozkład punktów w poprzek linii identyczności, a SD2 wzdłuż tej linii. SD1 opisuje krótkoterminową zmienność, a parametr SD2 długoterminową zmienność. Parametr SD1 w warunkach spoczynkowych, u zdrowego dorosłego człowieka osiąga wartości 66 ± 16 ms, natomiast parametr SD2 93 ± 19 ms [99].

Tabela 5.4. Wartości zmiennych, charakteryzujących poszczególne skupienia oraz badanych uczniów-operatorów [opracowanie własne]

Skupienie	Badany	SDNN	HR MAX	HR MIN	SD2	SD1	SD1/SD2
S1	6	29,371	147,42	67,345	40,082	10,911	0,272217
S2	14	48,059	104,6	60,546	65,414	18,428	0,281713
	16	55,334	111,61	64,879	75,487	20,633	0,273332
	18	56,767	104,09	64,483	75,81	26,252	0,346287
S3	1	34,9	101,84	64,949	47,687	12,835	0,269151
	5	31,562	123,56	61,158	43,761	8,845	0,202121
	9	38,394	110,74	63,83	51,012	18,639	0,365385
S4	3	26,392	124,48	80,994	35,558	11,248	0,316328
	4	24,385	122	85,33	48,56	8,353	0,172014
	7	28,666	134,53	82,192	39,789	7,8065	0,196197
	17	19,922	122,7	84,246	27,458	6,3306	0,230556
	21	21,04	114,72	83,025	28,85	7,2397	0,250943
S5	2	48	131,23	83,07	47,697	48,204	1,01063
	8	32,675	124,9	73,638	44,522	12,35	0,277391
	10	37,264	123,86	72,191	51,415	11,569	0,225012
	11	34,327	117,1	76,2	47,145	11,569	0,245392
	12	36,634	127,01	78,016	50,075	13,285	0,265302
	13	35,357	113,12	70,738	48,717	11,242	0,230761
	15	43,162	125,79	71,548	59,862	11,966	0,199893
	19	45,754	121,16	67,838	60,54	22,88	0,377932
	20	39,52	121,36	78,222	54,5	12,421	0,227908

Na podstawie analizy wyników, uzyskanych przez uczniów-operatorów w trakcie szkolenia praktycznego, można stwierdzić, że osiągnięte wartości wyniosły kolejno: dla parametru SD1 15 ± 9 oraz SD2 50 ± 13 ms. Stosunek parametrów SD1/SD2 charakteryzuje równowagę układu autonomicznego, a jego wartość normalna wynosi $0,29 \pm 0,16$. W trakcie wykonywania ćwiczeń szkoleniowych badani uzyskiwali wartości z zakresu $0,7 \pm 0,2$. Dodatkowo dokonano analizy parametrów tętna w trakcie wykonywania ćwiczeń szkoleniowych. Nie są to parametry charakteryzujące zmienność rytmu serca, jednak wykazywały one istotne różnice względem wartości spoczynkowych u badanych, dlatego postanowiono wykorzystać je w analizie. Analizy literaturowe wykazują, że tętno zdrowego, dorosłego człowieka powinno wynosić pomiędzy 60, a 90 uderzeń na minutę bpm (ang. *beats per minute*) [33, 43, 61, 63-65]. W trakcie praktycznej części szkolenia uczniowie-operatorzy uzyskiwali wartości z zakresu 120 ± 11 bpm, dla wartości maksymalnej tętna HR max oraz 73 ± 8 bpm, dla wartości minimalnej tętna HR min.

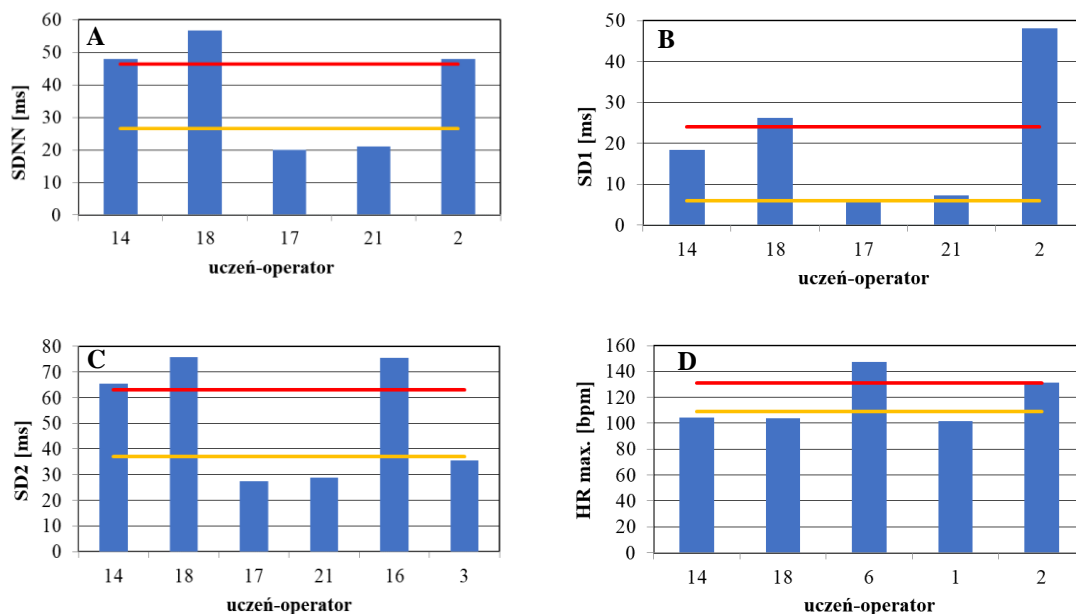
Na podstawie analizy źródeł literaturowych [2, 3, 12-13, 61, 63-65, 99] oraz uzyskanych wyników badań, opracowano układy odniesienia dla parametrów zmienności rytmu serca oraz tętna osiągnięte przez uczniów-operatorów w trakcie szkolenia (Tab. 5.5).

Tabela 5.5. Opracowany układ odniesienia parametrów HRV dla szkolenia praktycznego UAVO [opracowanie własne]

Parametry HRV	Wartości dla szkolenia UAVO [\bar{x} (SD)]
SDNN	36,5 (10)
SD1	15 (9)
SD2	50 (13)
SD1/SD2	0,29 (0,16)
HR max	120 (11)
HR min	73 (8)

Odnosząc opracowane zakresy do wyników pomiarów uzyskanych przez każdego z badanych (Rys. 5.8), można zauważyć, że od ustalonych układów odniesienia różnią się wyniki uzyskane przez uczniów-operatorów ze skupienia 2 oraz 4 (oznaczone kolorem niebieskim w Tab. 5.4). Dla poszczególnych parametrów, charakteryzujących HRV wybrano badanych, którzy osiągnęli wartości różne, od tych przyjętych (Tab. 5.5). Wyniki przedstawiono na rysunku 5.8. Linia o kolorze czerwonym oznaczono maksymalną wartość danej zmiennej [$\bar{x} + (SD)$], a linią pomarańczową wartość minimalną [$\bar{x} - (SD)$]. Wyznaczone linie określają zakres poszczególnych wartości wykorzystując opracowane układy odniesienia (Tab. 5.5).

Na podstawie utworzonych grup (Tab. 5.4), wyznaczonych układów odniesienia (Tab. 5.5) oraz opracowanych wykresów (Rys. 5.8) możliwe jest opracowanie profilu dla każdej z powstałych struktur (od S1 do S5).



Rys. 5.8. Wartości wybranych parametrów dla wskazanych w analizie badanych: A) parametr SDNN, B) Parametr SD1, C) Parametr SD2, D) Parametr HR max. Kolorem czerwonym i żółtym oznaczono odpowiednio zakres opracowanych układów odniesienia $\bar{X} + SD$ oraz $\bar{X} - SD$

Grupa S1

Badany z grupy S1 (6) charakteryzuje się wartościami zmiennych niewykraczającymi poza opracowane układy odniesienia (Tab. 5.5), w przypadku 5 zmiennych. Jedynie wartość HR max była większa od tych standardowych dla omawianej grupy badawczej. Ucznia-operatora ze struktury S1 można scharakteryzować jako odpowiednio zmobilizowanego do wykonania zadania [57, 62-65, 68, 99, 101, 103]. Duża wartość parametru HR max może wynikać z chwilowego odczucia stresu i krótkotrwałej reakcji, na zdarzenie, które wystąpiło w trakcie szkolenia praktycznego.

Grupa S2

W grupie S2 wartości parametrów HRV uzyskane przez badanych 14, 16, 18 są większe od przyjętych w układach odniesienia, co oznacza, że odchylenia (parametry SDNN, SD2 i SD1) w tym przypadku były większe od tych standardowych w grupie badawczej. Wskazuje to na niewielkie obciążenie zadaniem. Na podstawie uzyskanych wartości odchyleń oraz tętna można stwierdzić, iż wystąpiła niewielka aktywność układu współczulnego, co świadczy o nieznacznej mobilizacji organizmu do działania [2, 12-14, 26, 57, 62-65, 68, 99, 101, 103, 107, 130]. Może to oznaczać, iż uczniom-operatorom ze skupienia 2 nie zależało na prawidłowym wykonaniu ćwiczeń, o braku motywacji do wykonania zadania lub o jego niewielkim poziomie trudności.

Grupa S3 oraz S5

Badani w grupie S3 i S5 (wyjątek stanowi badany 2) charakteryzują się wartościami zmiennych niewykraczającymi poza opracowane układy odniesienia

(Tab. 5.5). Na podstawie uzyskanych przez uczniów-operatorów wartości można stwierdzić, iż badani byli odpowiednio zmobilizowani do wykonania zadania oraz nie odczuwali znaczącego stresu w trakcie operowania BSP. Wykonywane ćwiczenia nie były dla nich obciążające w znaczny sposób, a w trakcie szkolenia zachowywali spokój zadania [57, 62-65, 68, 99, 101, 103]. Uzyskane przez ucznia numer 2 większe wartości parametrów wskazują na niewielkie obciążenie zadaniem i świadczą o niewielkiej mobilizacji do wykonania zadania lub niewielkiej motywacji do prawidłowego wykonania ćwiczenia - podobnie, jak w grupie S2.

Grupa S4

Badani z grupy S4 (3, 17, 21) uzyskali wartości mniejsze, dla poszczególnych parametrów HRV, w porównaniu do opracowanych układów odniesienia. Mniejsze wartości świadczą o występującym znacznym obciążeniu zadaniowym poszczególnych badanych [2, 12-14, 26, 57, 62-65, 68, 99, 101, 103, 107, 130]. Na tej podstawie można wnioskować o występującej trudności z wykonaniem zadania, brakiem pewności w związku z wykonywanymi czynnościami lotniczymi oraz pojawiającym się stresie.

Na podstawie dokonanych analiz można stwierdzić, że w przypadku uczniów-operatorów o numerach 2 (S5), 14 (S2), 17 (S4), 18 (S2), 21 (S4), analiza stanu psychofizycznego, przy użyciu parametrów zmienności rytmu serca, wykazała znaczne lub niewielkie obciążenie zadaniowe. Najmniej pożądane wyniki uzyskali wskazani badani ze skupienia S2. Należałoby w przypadku wskazanych uczniów-operatorów wprowadzić i zastosować dodatkowe elementy szkolenia praktycznego, dostosowane do potrzeb danego ucznia. Profile grup S1, S3, S5 oraz otrzymywane przez badanych wartości poszczególnych zmiennych można wskazać jako te pożądane w trakcie szkolenia praktycznego do świadectwa kwalifikacji UAWO. Charakterystykę analizy czasowej HRV oraz przykłady innych badań przedstawiono w rozdziale 4 niniejszej rozprawy.

5.3. Analiza i wyniki badań dla obszaru szkolenia uczniów-pilotów do uprawnień PPL(A)

Analiza uzyskanych wyników została przeprowadzona w taki sam sposób, jak w badaniach, dotyczących uczniów-operatorów. W wyniku analiz dla każdego ucznia-pilota wyznaczono 10 zmiennych, odpowiednio dla pomiaru spoczynkowego i w trakcie wykonywania lotów szkoleniowych, również tożsame z analizą dla poprzedniej grupy badawczej. Odpowiednio obliczono parametry analizy czasowej: \bar{x} RR [ms], \bar{x} HR [bpm], HR max [bpm], HR min [bpm], SDNN [ms], RMSSD [ms], wskaźnik HRVI, oraz parametry analizy nieliniowej: SD1 [ms], SD2 [ms], SD1/SD2. Oznacza to, że po analizie w dedykowanym oprogramowaniu, każdego badanego opisywało łącznie 20 zmiennych, w dwóch typach pomiarów, dokładnie tak samo jak w przypadku grupy uczniów-operatorów.

Przy użyciu wyznaczonych zmiennych przeprowadzono analizę statystyczną (tabele 5.6-5.8).

Tabela 5.6. Wyniki testu normalności rozkładu zmiennych w grupie uczniów-pilotów

Zmienna	Test Shapiro - Wilka	P-value	istotność	Test
\bar{x} RR	0,86727	0,01298	p<0,05	nieparametryczny
\bar{x} RR*	0,95851	0,54333	p>0,05	
\bar{x} HR	0,93754	0,23804	p>0,05	nieparametryczny
\bar{x} HR*	0,29832	0,00000	p<0,05	
SDNN	0,73046	0,00013	p<0,05	nieparametryczny
SDNN*	0,93425	0,20728	p>0,05	
RMSSD	0,69359	0,00005	p<0,05	nieparametryczny
RMSSD*	0,91776	0,10287	p>0,05	
HR max	0,97252	0,82548	p>0,05	parametryczny
HR max*	0,90274	0,05456	p>0,05	
HR min	0,95606	0,49750	p<0,05	nieparametryczny
HR min*	0,96772	0,73005	p>0,05	
HRVI	0,84186	0,00496	p<0,05	nieparametryczny
HRVI*	0,95747	0,52372	p>0,05	
SD1	0,69350	0,00005	p<0,05	nieparametryczny
SD1*	0,91699	0,09954	p>0,05	
SD2	0,73365	0,00014	p<0,05	nieparametryczny
SD2*	0,95272	0,43911	p>0,05	
SD1/SD2	0,92322	0,12982	p>0,05	nieparametryczny
SD1/SD2*	0,89911	0,04688	p<0,05	

*zmiennie dla pomiaru referencyjnego

W celu sprawdzenia normalności rozkładów wykorzystano test Shapiro-Wilka. Wyniki uzyskanego testowania były analizowane z poziomem istotności 0,05. Jak można zauważyć (Tab. 5.6) tylko jedna zmienna charakteryzowała się rozkładem normalnym, w przypadku obu etapów badania. Dla zmiennych o rozkładzie normalnym zastosowano parametryczny test istotności – test t studenta, natomiast dla zmiennych, które nie charakteryzowały się rozkładem normalnym test nieparametryczny – Test Wilcoxon’a.

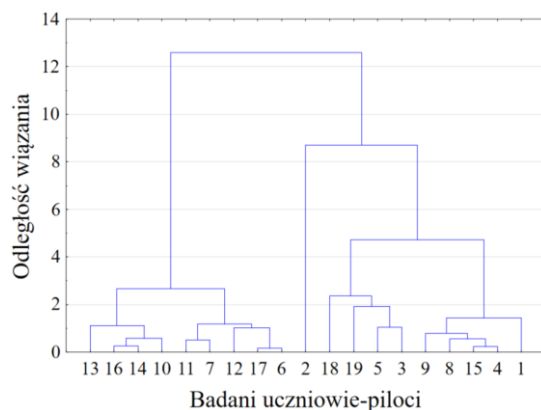
W tabeli 5.7 zebrano wyniki testów istotności przeprowadzonych dla poszczególnych zmiennych. Na poziomie istotności 0,05 istotne różnice pomiędzy pomiarem referencyjnym a porównawczym występowały dla wszystkich zmiennych. Dla zachowania jednorodności badań, do dalszych analiz wybrano te same parametry, jak w przypadku analizy uczniów-operatorów (oznaczone pogrubieniem w tabeli 5.7). Było to możliwe ze względu na uzyskane istotne różnice we wszystkich parametrach.

Tabela 5.7. Wyniki dla testów istotności w grupie uczniów-pilotów

Zmienna	Test t studenta	Test par Wilcoxon’a	p-value	istotność
\bar{x} RR		3,501070	0,000463	p<0,05
\bar{x} HR		2,655984	0,007908	p<0,05
SDNN		3,581554	0,00342	p<0,05
RMSSD		3,823007	0,000132	p<0,05
HR max	3,494944		0,002586	p<0,05
HR min		3,581554	0,000342	p<0,05
HRVI		3,742523	0,000182	p<0,05
SD1		3,823007	0,000132	p<0,05
SD2		3,581554	0,000342	p<0,05
SD1/SD2		3,219375	0,001285	p<0,05

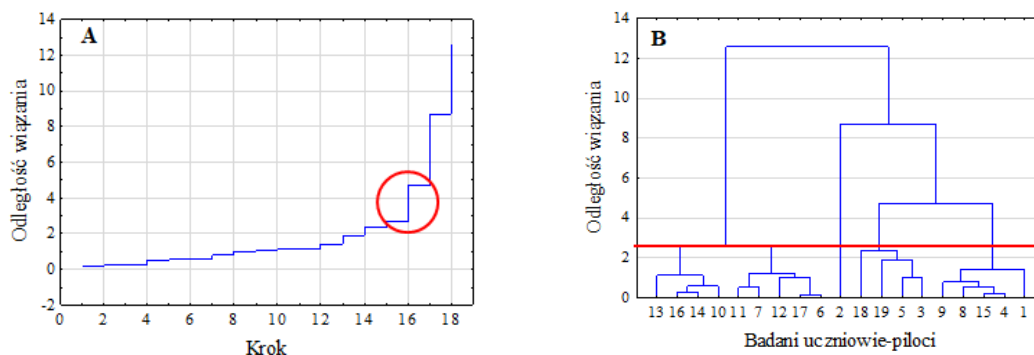
Na podstawie przeprowadzonych wstępnych analiz statystycznych wyznaczono zmienne, które wykazują istotne różnice i mogą różnicować grupę badawczą.

Kolejnym etap obliczeń było przeprowadzenie analizy wielowymiarowej, w taki sam sposób jak w przypadku poprzednich badań. Wynikiem pierwszego etapu jest drzewo hierarchiczne, które dla zebranych danych przedstawiono na rysunku 5.9.



Rys. 5.9. Drzewo hierarchiczne dla grupy uczniów-pilotów

Kolejnym krokiem tworzenia skupień jest sprawdzenie, w którym miejscu nastąpiła pierwsza znacząca zmiana odległości pomiędzy poszczególnymi, utworzonymi strukturami (oznaczona czerwonym okręgiem na rysunku 5.10A). Na rysunku 5.10A przedstawiono odległość dla poszczególnych kroków tworzenia struktur, oraz miejsce (czerwona linia), w którym zdecydowano podzielić, utworzoną strukturę na poszczególne skupienia (Rys. 5.10B). Podobnie jak w analizie poprzedniej grupy uczniów-operatorów pierwsza znacząca różnica pomiędzy wartościami odległości wiązania nastąpiła w kroku 16 i była to wartość równa 2,5. Oznacza to, że grupy utworzone przy odległości wiązania nie większej niż 2,5 są silniej powiązane niż struktury utworzone powyżej wskazanej wartości.



Rys. 5.10. A) Poszczególne kroki tworzenia struktur B) utworzone drzewo hierarchiczne dla grupy uczniów-pilotów. Czerwonym okręgiem oraz linią zaznaczono miejsce tworzonych skupień [opracowanie własne]

W wyniku podziału otrzymano 5 skupień, a następnie dokonano ich oceny przy użyciu całkowitego wskaźnika sylwetkowego GSI [9], określanego wzorem 12. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w tabeli 5.8. Na podstawie cząstkowych indeksów sylwetkowych $S(S_i)$ stwierdzono, iż grupę S2 oraz S4 cechuje największa

wartość tego wskaźnika. Oznacza to, że te struktury są najsilniej powiązane i uzyskały najbardziej zbliżone wartości zmiennych, które charakteryzują badanych (SDNN, SD1, SD2, SD1/SD2, HR min, HR max). Uczeń reprezentujący grupę S1 (2) uzyskał wartości poszczególnych analizowanych zmiennych znacznie odległe od kandydatów w pozostałych strukturach (S2-S5), co wpłynęło na utworzenie jednoosobowej grupy i uzyskanie cząstkowego wskaźnika $S(S_i)$ o wartości wynoszącej 1. Grupa S3 nie jest tak silnie powiązana jak grupy S2 i S4. Struktura S5 jest najsłabiej powiązaną grupą. Oznacza to, że badanych reprezentujących to skupienie charakteryzują większe odległości pomiędzy poszczególnymi analizowanymi zmiennymi (SDNN, SD1, SD2, SD1/SD2, HR min, HR max). Uzyskana wartość całkowitego wskaźnika sylwetkowego GSI równa 0,51 wskazuje na **poprawną strukturę grupowania**. Oznacza to, że tak przygotowane grupy badanych osób można wykorzystać w dalszej analizie danych.

Tabela 5.8. Wyniki analizy skupień przy użyciu całkowitego wskaźnika sylwetkowego GSI dla grupy uczniów-pilotów [opracowanie własne]

Skupienie	Badany	a_i	d_{iS1}	d_{iS2}	d_{iS3}	d_{iS4}	d_{iS5}	b_i	$S_{(i)}$	$S_{(S_i)}$	GSI
S1	2	0,00		6,61	6,15	5,60	5,89	5,60	1,00	1,00	0,51
S2	10	0,65	6,48		1,14	2,18	3,88	1,14	0,42	0,56	
	13	0,88	6,47		1,45	2,43	4,18	1,45	0,39		
	14	0,50	6,83		1,07	2,17	3,83	1,07	0,54		
	16	0,57	6,67		0,86	1,93	3,59	0,86	0,34		
S3	6	0,61	5,83	1,33		0,98	2,72	0,98	0,38	0,31	
	7	0,69	6,4	1,26		1,18	2,77	1,18	0,41		
	11	0,79	6,63	0,81		1,63	3,24	0,81	0,02		
	12	0,93	5,97	0,94		1,64	3,38	0,94	0,01		
	17	0,57	5,94	1,31		0,98	2,69	0,98	0,42		
S4	1	1,09	4,89	2,30	1,47		2,30	1,47	0,26	0,51	
	4	0,57	5,74	2,04	1,10		2,09	1,10	0,49		
	8	0,75	6,08	1,88	0,97		2,19	0,97	0,23		
	9	0,81	5,68	2,58	1,62		1,62	1,62	0,50		
	15	0,54	5,59	2,10	1,24		1,94	1,24	0,57		
S5	3	1,46	5,08	4,21	3,25	2,16		2,16	0,33	0,14	
	5	1,53	6,1	4,26	3,31	2,29		2,29	0,33		
	18	2,07	5,59	3,70	2,81	1,89		1,89	-0,09		
	19	2,04	6,8	3,31	2,47	1,76		1,76	-0,14		

Na podstawie przygotowanych skupień opracowano tabelę, w której zawarto wartości parametrów charakteryzujące każdego z badanych (Tab. 5.9). Wartość normalna parametru SDNN dla zdrowego człowieka, w warunkach spoczynkowych wynosi 50 ± 15 ms. Analizując wyniki uzyskane z pomiarów w trakcie wykonywania ćwiczeń szkoleniowych, na podstawie obliczeń wykazano, że parametr ten w trakcie lotów szkoleniowych w grupie uczniów-pilotów osiąga wartości 20 ± 10 ms. Kolejnymi analizowanymi parametrami są SD1 i SD2, a ich dokładna charakterystyka została przedstawiona w rozdziale 4.2. Parametr SD1 w warunkach spoczynkowych, u zdrowego dorosłego człowieka osiąga wartości 66 ± 16 ms, natomiast parametr SD2 93 ± 19 ms.

Tabela 5.9. Wartości zmiennych, charakteryzujących poszczególne skupienia oraz badanych uczniów-pilotów[opracowanie własne]

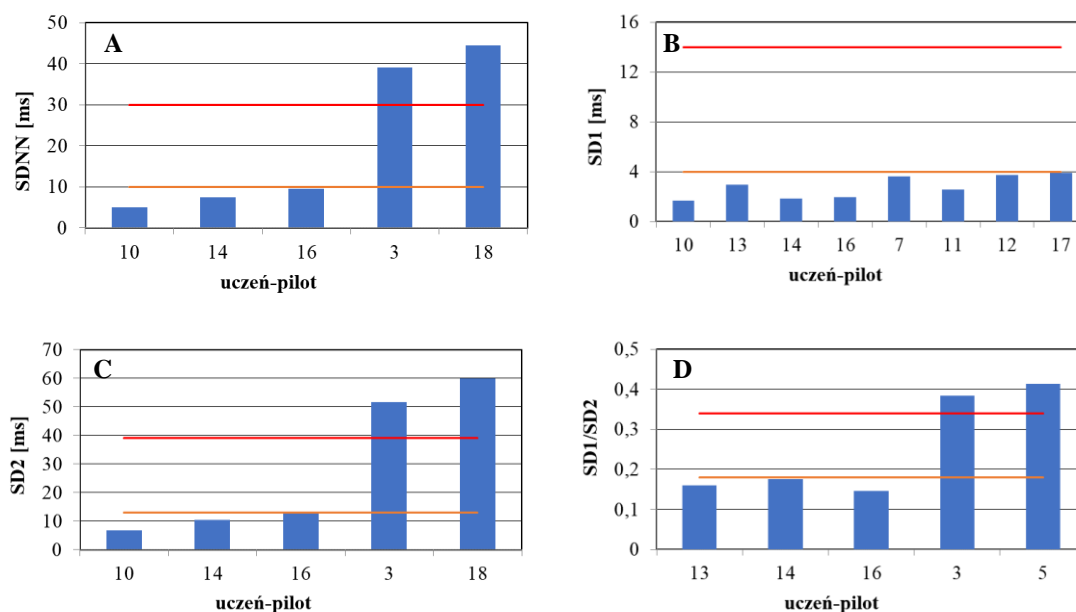
Skupienie	Badany	SDNN	HR MIN	HR MAX	SD1	SD2	SD1/SD2
S1	2	22,74	67,633	191,02	9,15	30,6	0,3793818
S2	10	4,921	117,14	157,32	1,656	6,765	0,24478936
	13	13,354	129,81	165,11	2,969	18,663	0,15908482
	14	7,435	123,1	150,75	1,816	10,357	0,17534035
	16	9,5186	120,43	146,86	1,945	13,325	0,14596623
S3	6	18,277	103,59	142,79	8,353	24,457	0,34153821
	7	12,988	108,15	130,83	3,627	18,02	0,20127636
	11	10,172	115,7	137,61	2,569	14,13	0,18181175
	12	15,528	109,41	160,09	3,728	20,218	0,18439015
	17	17,298	104,93	139,21	3,888	24,103	0,16130772
S4	1	27,726	88,611	148,15	8,6178	38,269	0,2251901
	4	19,324	90,552	131,29	7,2523	26,34	0,27533409
	8	16,702	95,816	125,31	8,26	22,142	0,3730467
	9	23,765	88,132	115,92	8,976	32,387	0,27714824
	15	21,848	90,036	128,64	6,9391	30,092	0,23059617
S5	3	39,086	66,543	98,814	19,785	51,643	0,38311097
	5	28,531	64,865	82,713	15,146	36,621	0,41358783
	18	44,527	78,126	126,46	18,357	59,968	0,30611326
	19	13,552	79,093	90,689	6,089	18,155	0,3353897

Na podstawie analizy wyników, uzyskanych przez uczniów-pilotów w trakcie szkolenia lotniczego, można stwierdzić, że osiągnęte wartości wyniosły kolejno: dla parametru SD1 9 ± 5 ms oraz SD2 26 ± 13 ms. Stosunek parametrów SD1/SD2 wynosi, w warunkach spoczynkowych $0,29 \pm 0,16$. W trakcie wykonywania lotów szkoleniowych badani uzyskiwali wartości z zakresu $0,26 \pm 0,08$. Dodatkowo dokonano analizy parametrów tętna. W trakcie praktycznej części szkolenia uczniowie-piloci uzyskiwali wartości z zakresu 135 ± 26 bpm, dla wartości maksymalnej tętna HR max oraz 77 ± 820 bpm, dla wartości minimalnej tętna HR min. Na podstawie analizy źródeł literaturowych [2, 3, 12-13, 61, 63-65, 99] oraz uzyskanych wyników badań, opracowano układy odniesienia dla parametrów zmienności rytmu serca oraz tętna osiągnęte przez uczniów-pilotów w trakcie lotów szkoleniowych (Tab. 5.10).

Tabela 5.10. Opracowany układ odniesienia parametrów HRV dla szkolenia lotniczego PPL(A) [opracowanie własne]

Parametry HRV	Wartości dla szkolenia PPL(A) [\bar{x} (SD)]
SDNN	20 (10)
SD1	9 (5)
SD2	26 (13)
SD1/SD2	0,26 (0,08)
HR max	135 (26)
HR min	97 (20)

Odnosząc opracowane zakresy odniesienia do wyników pomiarów uzyskanych przez każdego z badanych (tab. 5.9), można zauważyć, że od ustalonych układów odniesienia różnią się wyniki uzyskane przez uczniów-pilotów ze skupienia 2 oraz 5 (oznaczone kolorem niebieskim w tabeli 5.9). Dla poszczególnych parametrów, charakteryzujących HRV wybrano badanych, którzy osiągnęli wartości różne, od tych przyjętych w opracowanych układach odniesienia. Wyniki przedstawiono na rysunku 5.11.



Rys. 5.11. Wartości wybranych parametrów dla wskazanych w analizie badanych: A) parametr SDNN, B) Parametr SD1, C) Parametr SD2, D) Parametr SD1/SD2. Kolorem czerwonym i żółtym oznaczono odpowiednio zakres opracowanych układów odniesienia $\bar{X} + SD$ oraz $\bar{X} - SD$

Na podstawie utworzonych grup (Tab 5.8), wyznaczonych układów odniesienia (Tab. 5.10) oraz opracowanych wykresów (Rys. 5.11) możliwe jest opracowanie profilu dla każdej z powstałych struktur (od S1 do S5).

Grupa 1

Badany z grupy S1 (2) charakteryzuje się wartościami parametrów opisujących zmienność rytmu serca HRV niewykraczającymi poza opracowane układy odniesienia (Tab. 5.10). Jedynie wartości HR max oraz HR min są różne od tych standardowych dla omawianej grupy badawczej. Ucznia-pilota ze struktury S1 można scharakteryzować jako odpowiednio zmobilizowanego do wykonania zadania [26, 57, 62-65, 68, 99, 101, 103, 107]. Duża wartość parametru HR max może wynikać z chwilowego odczucia stresu i krótkotrwałej reakcji na zdarzenie, które wystąpiło w trakcie szkolenia praktycznego, a niewielka wartość HR min może być spowodowana tendencją do mniejszej liczby uderzeń serca na minutę.

Grupa 2

Wartości parametrów HRV uzyskane przez badanych ze skupienia 2 są mniejsze od przyjętych układów odniesienia (Tab. 5.10), co oznacza, że odchylenia w tym przypadku były mniejsze od tych standardowych u uczniów-pilotów. Wskazuje to na znaczne obciążenie zadaniem, ponieważ zgodnie z analizą literaturową im mniejsze wartości parametrów odchylenia tym większe obciążenie zadaniowe [2, 12-14, 26, 57, 62-65, 68, 99, 101, 103, 107, 130]. Na podstawie uzyskanych wartości można stwierdzić, iż przeważała aktywność układu współczulnego, co świadczy o dużej mobilizacji organizmu do działania oraz o możliwej trudności z wykonaniem zadania, brakiem pewności w związku z podejmowanymi czynnościami lotniczymi oraz pojawiającym się stresem [62-65, 68, 99, 101].

Grupa 3 i 4

Badani w grupie S3 i S4 charakteryzują się wartościami zmiennych niewykraczającymi poza opracowane układy odniesienia (Tab. 5.10). Na podstawie uzyskanych przez uczniów-pilotów wartości można stwierdzić, iż badani byli odpowiednio zmobilizowani do wykonania operacji lotniczej oraz nie odczuwali znaczącego obciążenia zadaniem. Analizując uzyskane wartości parametrów można stwierdzić, iż podczas realizacji ćwiczenia nie odczuwali znaczącego stresu, a w trakcie szkolenia zachowywali spokój [62-65, 68, 99, 101].

Grupa 5

Badani ze skupienia 5 (3, 5, 18) uzyskali wartości większe, dla poszczególnych parametrów HRV, w porównaniu do opracowanych układów odniesienia. Większe wartości świadczą o występującym niewielkim obciążeniu zadaniowym poszczególnych badanych [26, 63-65, 68, 99, 107]. Może to oznaczać, iż uczniom-pilotom ze skupienia 5 nie zależało na prawidłowym wykonaniu ćwiczeń oraz o braku motywacji do wykonania zadania. Wykonywane ćwiczenie mogło również być dla kandydatów łatwe i nieobciążające, co świadczy o odczuciu pewności w trakcie zadania oraz jego powtarzalności. W takim przypadku bardzo istotna jest prawidłowość realizowanego ćwiczenia.

Na podstawie dokonanych analiz można stwierdzić, że w przypadku uczniów-pilotów o numerach 10, 14, 16 (grupa S2) analiza stanu psychofizycznego, przy użyciu parametrów zmienności rytmu serca, wykazała znaczne obciążenie zadaniowe. Należałoby w przypadku wskazanych uczniów-pilotów wprowadzić i zastosować dodatkowe elementy szkolenia praktycznego, dostosowane do potrzeb danego ucznia. W przypadku kandydatów 3, 5 oraz 18 (grupa S5) ważnym elementem oceny jest prawidłowość wykonywanego zadania. Wskazani uczniowie mogą być niemobilizowani do wykonania ćwiczenia lub jest ono dla nich bardzo łatwe i nieobciążające. Profile grup S3 i S4 oraz otrzymywane przez badanych wartości poszczególnych zmiennych można wskazać jako te pożądane w trakcie szkolenia praktycznego do licencji PPL(A).

6. Próba obiektywizacji oceny uczniów w podstawowych szkoleniach lotnictwa ogólnego

6.1. Metodyka oceny stanu psychofizycznego ucznia-pilota oraz ucznia-operatora

Na podstawie przeprowadzonych badań, analiz oraz przygotowanych układów odniesienia postanowiono opracować metodykę oceny stanu psychofizycznego ucznia-pilota oraz ucznia-operatora, która może być wykorzystywana przez różne Ośrodki Szkolenia Lotniczego w ramach przeprowadzanych podstawowych szkoleń w lotnictwie ogólnym. W niniejszym rozdziale zostanie przedstawiony sposób przeprowadzania badania w trakcie szkolenia, zaproponowana aparatura badawcza oraz przedstawiony opracowany model, który w łatwy sposób może być wykorzystywany przez instruktorów w trakcie szkolenia lotniczego.

Podstawą metodyki oceny stanu psychofizycznego uczniów jest wprowadzenie do użytkowania w trakcie szkoleń aparatury dokonującej pomiaru parametrów zmienności rytmu serca HRV. Podstawą wyznaczania parametrów HRV jest długość interwałów RR podawana w milisekundach. Dostępnych jest kilka tego typu urządzeń, które spełniają określone poniżej wymagania podyktowane warunkami szkolenia lotniczego:

- pełna mobilność,
- nieinwazyjność,
- ciągłość pomiaru,
- łatwość obsługi.

Są to urządzenia zazwyczaj w postaci pasów, które osoba badana zakłada na klatkę piersiową (Rys. 6.1). Każda z nich posiada dedykowane aplikacje, które zbierają dane i eksportują do plików typu csv. Przykładem takiego urządzenia jest pas Polar H10 stosowany do przeprowadzenia badań, realizowanych w ramach niniejszej rozprawy. Innym urządzeniem może być pas firmy Zencro, umożliwiający pomiar interwałów R-R czy Zephyr Performance System. Pomiar możliwy jest również w niektórych modelach zegarków Garmin.



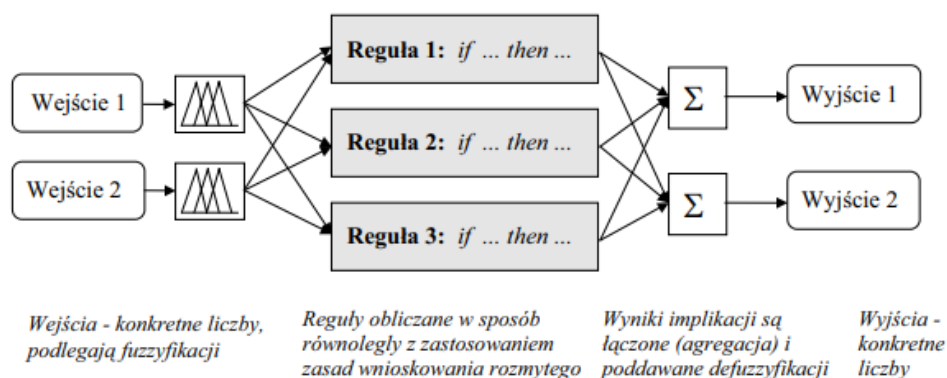
Rys. 6.1. Przykłady aparatury badawczej stosowanej w proponowanej metodzie SPU [98]

Dostępność urządzeń monitorujących aktywność układu sercowo-naczyniowego jest bardzo duża, a koszty związane z zakupem taego typu apratury nie są duże (około 300 zł). Eliminuje to problemy, dotyczące pozyskania urządzenia pomiarowego. Przy wykorzystaniu czujnika monitorującego długość interwałów R-R możliwe jest dokonywanie ciągłych pomiarów w trakcie wykonywania poszczególnych ćwiczeń szkoleniowych przez ucznia-pilota lub ucznia-operatora. Na podstawie dokonanego

w trakcie szkolenia pomiaru, można wyznaczyć poszczególne parametry, charakteryzujące HRV.

Zgodnie z tym, co wykazano w ramach przeprowadzonych badań, parametrami, które najlepiej różnicują poszczególnych badanych są: parametr analizy czasowej (SDNN) oraz parametry analizy nieliniowej (SD1, SD2, SD1/SD2). Wartości tych parametrów, w proponowanej metodyce będą służyły ocenie stanu psychofizycznego ucznia-pilota oraz ucznia-operatora w trakcie szkolenia lotniczego. Przy wykorzystaniu opracowanych w poprzednim rozdziale układów odniesienia (zakresów) instruktor będzie mógł dokonać oceny stanu psychofizycznego ucznia. W ramach uproszczenia przeprowadzania procesu oceny opracowano konkretny model.

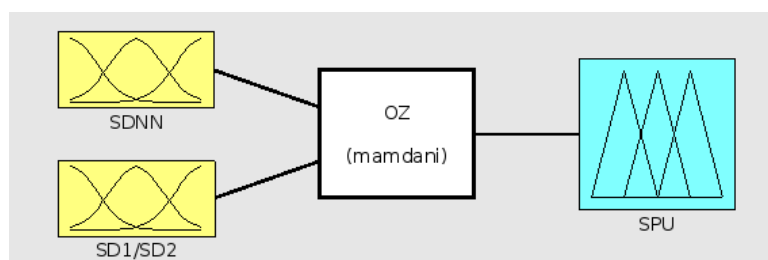
Przedstawiony model pozwala na ocenę tzw. zgodności z opracowanymi układami odniesienia (Tab. 5.7 i 5.10) w przypadku stanu psychofizycznego ucznia. Opracowany model opiera się na analizie jakościowej, do której wykorzystano dane z badań ilościowych, przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy. Do budowy modelu potrzebne są cechy wartościowane empirycznie. Oznacza to, iż na wejściu do modelu wprowadza się, przedstawione wcześniej cechy. Założeniem modelu jest uzyskanie informacji zwrotnej na temat cechy wartościującej, czyli stanu psychofizycznego ucznia-pilota. Dla instruktora opis analityczny uzyskanych cech wartościowanych byłby bardzo złożony i trudny, nawet przy istniejącym układzie odniesienia, dlatego biorąc to pod uwagę w opracowanym modelu postanowiono skorzystać z logiki rozmytej, której zastosowanie umożliwi wykorzystanie skali do oceny stanu psychofizycznego. Logika rozmyta stanowi rozszerzenie klasycznego rozumowania (logiki klasycznej, ilościowej) na bliższe jakościowemu. Wprowadza ona wartości pomiędzy standardowe 0 i 1 oraz rozmywa granice pomiędzy nimi dając możliwość zaistnienia wartościom z pomiędzy tego przedziału (np.: prawie fałsz, w połowie prawda) [100]. Stanowi to podstawę do przeprowadzenia oceny stanu psychofizycznego przy użyciu metod jakościowych, które znacznie lepiej nadają się do badań oraz analiz, dotyczących stanu człowieka, który bardzo ciężko zamknąć w klasycznym ujęciu zera i jedynki. Do opracowania modelu wykorzystano narzędzie *Fuzzy Logic Designer*, będące jedną z aplikacji, wykorzystywanych w oprogramowaniu Matlab, a sam model działa w oparciu o klasyczny układ rozmyty (Rys. 6.2).



Rys. 6.2. Schemat klasycznego układu rozmytego [102]

Jako elementy wejściowe zastosowano parametry SDNN oraz SD1/SD2 i przyporządkowano im skalę od 0 do 5. Parametry wybrano ze względu na fakt, iż należą one do parametrów wykazujących istotne na poziomie statystycznym różnice. W celu możliwego uproszczenia modelu pominięto parametry SD1 oraz SD2, które znajdują odzwierciedlenie w parametrze SD1/SD2, będącym ilorazem obu (Rys. 6.3).

Dzięki pominięciu poszczególnych wartości SD1 i SD2, model charakteryzuje się mniejszym poziomem skomplikowania, co w przypadku opracowywanej metody ma istotne znaczenie, ze względu na wykorzystywanie go w trakcie lotów rzeczywistych, przez osoby (instruktorów) nieposiadające wiedzy merytorycznej z zakresu metod obiektywnych oceny stanu psychofizycznego.



Rys. 6.3. Okno wprowadzanego systemu w narzędziu Matlab [opracowanie własne]

Każde z wejść opisane zostało przez trzy funkcje przynależności, o kształcie funkcji Gaussa. Poszczególne funkcje nazwano odpowiednio: małe, w normie oraz duże, co odpowiada opracowanym wcześniej układom odniesienia (Tab. 6.1), jednak dzięki zastosowaniu logiki rozmytej eliminuje się podejście logiki klasycznej, która nie sprawdzi się w przypadku tak wrażliwej cechy wartościującej, jak stan psychofizyczny człowieka. W ujęciu logiki klasycznej osoba korzystająca z modelu musiałaby uznać np. wartość SDNN równą np. 11 za wychodzącą poza układ odniesienia i nadać wartość „0”. W przypadku zastosowania logiki rozmytej, wartość spoza zakresu nadal może być rozważana.

Tabela 6.1. Układ odniesienia dla cech wartościowanych oraz zastosowane funkcje przynależności [opracowanie własne]

UCZEŃ-PILOT		UCZEŃ-OPERATOR	
SDNN	SD1/SD2	SDNN	SD1/SD2
SDNN < 10 (MAŁE)	< 0,18 (MAŁE)	SDNN < 26 (MAŁE)	< 0,13 (MAŁE)
10 ÷ 30 (W NORMIE)	0,18 ÷ 0,34 (W NORMIE)	26 ÷ 46 (W NORMIE)	0,13 ÷ 0,45 (W NORMIE)
SDNN > 30 (DUŻE)	> 0,34 (DUŻE)	SDNN > 46 (DUŻE)	> 0,45 (DUŻE)

Jako wyjście modelu zastosowano cechę wartościującą, czyli stan psychofizyczny ucznia-pilota lub ucznia-operatora. Wyjście modelu przyjmuje wartości od 0 do 10 i również zostało opisane przez trzy funkcje przynależności. Jednak ze względu na specyfikę docelowego zastosowania modelu oraz jego przeznaczenie, funkcje te zostały opisane następującymi zakresami dla stanu psychofizycznego:

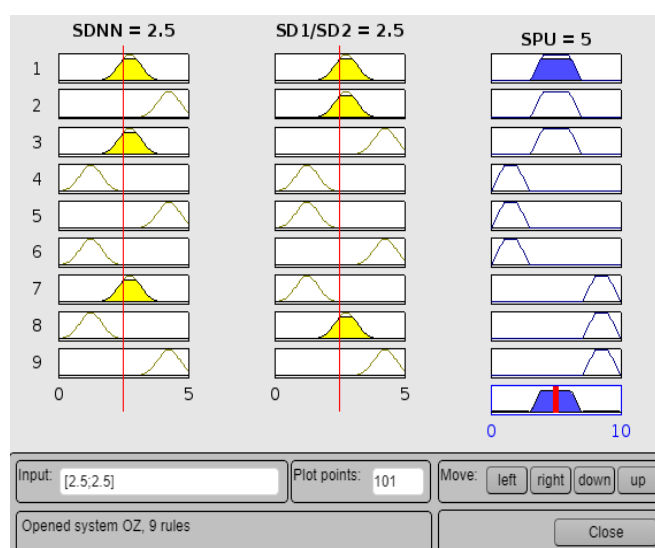
- stan nietolerowany (wartości od 0 do 3),
- stan dobry (wartości od 3 do 7),
- stan tolerowany (wartości od 7 do 10).

W modelowaniu zastosowano defuzyfikację metodą środka ciężkości, która jest jedną z metod uwzględniających wszystkie aktywne reguły w procesie defuzyfikacji. Takie podejście gwarantuje największą wrażliwość na zmiany parametru [133]. Zastosowano wnioskowanie typu Mamdani, które jest najbardziej neutralnym podejściem i może być szeroko stosowane. Dodatkowo jest to najkorzystniejsza metoda wnioskowania w przypadku niewielkiej liczby zmiennych na wejściu modelu. Ważnym elementem budowania modelu jest wprowadzenie odpowiednich reguł zgodnie z założeniami jego działania. W modelu zastosowano reguły przedstawione w macierzy (Tab. 6.2). W każdej regule wykorzystano łącznik „i” (ang. *and*).

Tabela 6.2. Macierz wprowadzanych reguł do modelu

SD1/SD2 \ SDNN	małe	w normie	duże
małe	nietolerowany	tolerowany	nietolerowany
w normie	tolerowany	dobry	dobry
duże	nietolerowany	dobry	tolerowany

Wynikiem opracowanego modelu jest graficzne przedstawienie reguł oraz wykres powierzchniowy. W polu „input” należy wprowadzić wartości ze skali przyporządkowane poszczególnym cechom wartościowym (od 0 do 5) i odczytać wynik dla cechy wartościującej, czyli stanu psychofizycznego ucznia SPU.

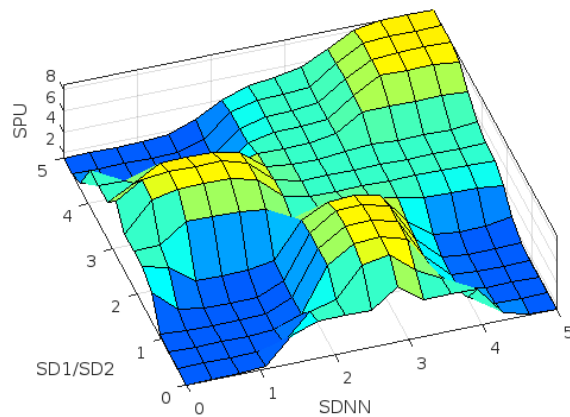


Rys. 6.4. Graficzne przedstawienie reguł

Następnie, na podstawie opracowanego w ramach modelu układu odniesienia, dla skali SPU od 0 do 10 otrzymano informację typu deskrypcyjnego – w przykładzie przedstawionym na rysunku 6.4: SPU równe 5 oznacza stan dobry. Wykres powierzchniowy dostarcza takiej samej informacji zwrotnej, jednak przy innym sposobie odczytu (Rys. 6.5).

Na tym etapie rozprawy postanowiono przyjąć następującą terminologię:

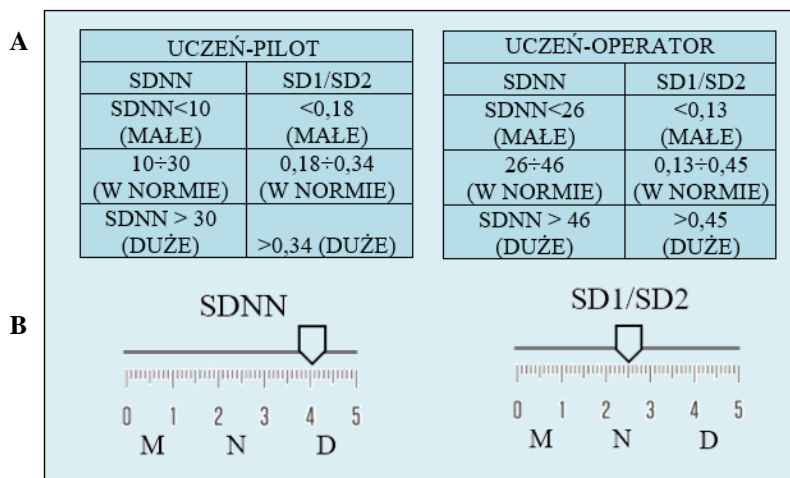
- model SPU – analiza samego stanu psychofizycznego ucznia przy użyciu logiki rozmytej,
- metoda SPU – opracowana metodyka badawcza jako całość, razem z analizą oraz propozycją usprawnienia podstawowych szkoleń lotniczych lotnictwa ogólnego.



Rys. 6.5. Wykres powierzchniowy dla opracowanego modelu [opracowanie własne]

Opracowany model SPU stanowi podstawę do przygotowania pełnego algorytmu aplikacji i może być jednocześnie wykorzystywany do badań nad uczniami-pilotami oraz uczniami-operatorami. Czynnikiem zmiennym są jedynie układy odniesienia, z których docelowo ma korzystać instruktor w trakcie danego szkolenia. Przy wykorzystaniu opracowanego modelu oraz aparatury w postaci czujnika założonego na klatkę piersiową można w łatwy sposób obserwować zmiany stanu psychofizycznego ucznia-pilota lub ucznia-operatora w trakcie szkolenia praktycznego, co w pozytywny sposób wpłynie na jego realizację poprzez dokładniejszą obserwację i wyznaczanie zadań sprawiających trudność.

Zgodnie z opracowaną metodą w trakcie wykonywania poszczególnych ćwiczeń przeprowadzany będzie pomiar pracy układu sercowo-naczyniowego. Do pomiaru potrzebny jest czujnik w postaci pasa oraz urządzenie mobilne takie jak smartphone lub tablet, które można umieścić na tylnej kanapie samolotu szkoleniowego lub w pobliżu wykonywania lotów bezzałogowym statkiem powietrznym. Standardowy zasięg takich urządzeń to około 50-60 metrów. Następnie, przy użyciu dedykowanego oprogramowania obliczane będą parametry SDNN oraz SD1/SD2. Instruktor, mając do wglądu opracowane tabele z układami odniesienia oceni w skali od 0 do 5 wartość danego parametru.



Rys. 6.6. A) Układy odniesienia, B) skale stosowane w metodzie SPU

Schemat działania aplikacji, która ułatwiłaby korzystanie z metody oraz wykonywane kolejno czynności będzie następujący:

1. Wprowadzenie danych dotyczących ucznia m.in.: płeć, wiek, doświadczenie lotnicze.
2. Wybór wykonywanego w ramach lotów ćwiczenia oraz wprowadzenie danych, dotyczących trasy, takich jak data, godzina rozpoczęcia lotu, planowana godzina zakończenia lotu.
3. Rozpoczęcie pomiaru pracy układu sercowo-naczyniowego.
4. Wykonanie zadania ćwiczeniowego.
5. Przy użyciu oprogramowania podanie przez aplikację parametrów SDNN i SD1/SD2. Na przykład: podanie parametru SDNN dla ucznia-pilota o wartości 32 i parametru SD1/SD2 o wartości 0,3.
6. Na podstawie uzyskanych wartości wprowadzenie przez instruktora określonej wartości na skali oceny obu parametrów (Rys. 6.6 B) z uwzględnieniem podanego układu odniesienia (Rys. 6.6 A). Przykładowe ocenienie przez instruktora wartości parametrów na skali: SDNN → 4 oraz SD1/SD2 → 2,5.
7. Przy użyciu opracowanego modelu odczytanie wartości uzyskanego SPU oraz jego deskryptywna ocena przy użyciu wskazanych zakresów. W omawianym przykładzie SPU ma wartość 5, co na podstawie opracowanych zakresów (Tab. 6.3) oznacza stan psychofizyczny dobry.

Tabela 6.3. Zakresy i ich charakterystyka deskryptywna stosowane w opracowanym modelu

Zakres wartości SPU	Ocena deskryptywna stanu psychofizycznego
Od 0 do 3	nietolerowany
Od 4 do 7	dobry
Od 8 do 10	tolerowany

Informacje dotyczące usprawnienia podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego, z wykorzystaniem opracowanej metody SPU zostaną przedstawione w kolejnym rozdziale niniejszej rozprawy.

6.2. Propozycja usprawnienia podstawowych szkoleń lotniczych lotnictwa ogólnego

Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz opracowanego modelu SPU postanowiono przedstawić propozycję usprawnienia podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego o wprowadzenie metody oceny stanu psychofizycznego ucznia-pilota i ucznia-operatora (metoda SPU). Zgodnie z założeniami pracy propozycja będzie przedstawiona dla szkolenia do świadectwa kwalifikacji UAVO, uprawniającego do wykonywania lotów w zasięgu wzroku oraz dla licencji PPL(A). Zaproponowane rozwiązanie przeznaczone ma być do użytku w ośrodkach kształcenia lotniczego i wykorzystywane przez instruktorów w trakcie części praktycznej. Wprowadzenie metody do szkolenia lotniczego powinno nastąpić po odbyciu przez ucznia-pilota kilku godzin lotów, ale przed pierwszym lotem samodzielnym, tak aby sprawdzić stan psychofizyczny w trakcie wykonywania poszczególnych ćwiczeń.

Wykorzystanie opracowanej metody związane jest również z modyfikacją tradycyjnego programu szkolenia. Przykładowy przebieg realizacji szkolenia:

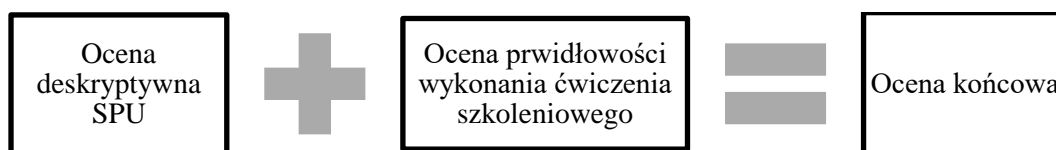
1. Osoba zgłasza chęć do uzyskania licencji pilota samolotowego turystycznego lub operatora bezzałogowego statku powietrznego.
2. Po wykonaniu badań lekarskich oraz dostarczeniu stosowanej dokumentacji osoba zostaje uczniem-pilotem do licencji pilota samolotowego lub uczniem-operatorem do świadectwa kwalifikacji UAWO.
3. Uczeń-pilot lub uczeń-operator realizuje część teoretyczną szkolenia do poszczególnych uprawnień.
4. Kierownik szkolenia przy współpracy z certyfikowanym ośrodkiem szkolącym ustala harmonogram prowadzenia szkolenia praktycznego dla instruktorów zatrudnianych w danym Ośrodku Szkolenia Lotniczego.
5. Przeprowadzenie szkolenia praktycznego przy użyciu nowoczesnej metody oceny stanu psychofizycznego ucznia-pilota lub ucznia-operatora.
6. Organizacja egzaminu dla ucznia-pilota do licencji pilota samolotowego turystycznego lub ucznia-operatora do świadectwa kwalifikacji UAWO.

Proponowane usprawnienie oparte jest na 5 elementach przedstawionych na rys. 6.7.



Rys. 6.7. Poszczególne elementy metody SPU [opracowanie własne]

Wykorzystując opracowaną metodę SPU (przedstawioną w rozdziale 6.1), w trakcie szkolenia lotniczego należy wprowadzić system oceniania wykonanego ćwiczenia szkoleniowego rozszerzony o wynik SPU (Rys. 6.7).



Rys. 6.8. Schemat składowych oceny końcowej

Podstawowymi składowymi takiego systemu oceniania jest poprawność wykonania ćwiczenia (Tab. 6.4) oraz ocena stanu psychofizycznego, które razem będą stanowiły o ocenie końcowej ćwiczenia (Rys. 6.8).

Tabela 6.4. Oceny stosowane w trakcie szkolenia w metodzie SPU

Ocena ćwiczenia \ Stan SPU	nietolerowany	tolerowany	dobry
	prawidłowo	3	4
nieprawidłowo	0	1	2

Poszczególnym wariantom oceny deskryptywej SPU oraz poprawności wykonania ćwiczenia przyporządkowano konkretne wartości liczbowe (Tab. 6.4), którym odpowiadają przedstawione poniżej czynności korygujące:

- ocena 5 – ćwiczenie wykonane prawidłowo z dobrym SPU, nie ma potrzeby wykonywania dodatkowych czynności,
- ocena 4 – ćwiczenie wykonane prawidłowo z tolerowanym SPU, nie ma potrzeby wykonywania dodatkowych czynności,
- ocena 3 – ćwiczenie wykonane prawidłowo z nietolerowanym SPU, należy powtórzyć ćwiczenie szkoleniowe, aż do uzyskania przez ucznia stanu tolerowanego lub dobrego w trakcie wykonywania ćwiczenia; w przypadku braku poprawy SPU pomimo kilkukrotnego powtórzenia ćwiczenia, decyzja o kontynuowaniu szkolenia przez danego ucznia zależy od instruktora,
- ocena 2 – ćwiczenie wykonane nieprawidłowo z dobrym stanem SPU, należy powtórzyć ćwiczenie szkoleniowe, aż do przejścia ucznia do oceny co najmniej 3; w przypadku dalszych nieprawidłowości kontynuowanie szkolenia i podejście do egzaminu uprawniającego nie jest możliwe,
- ocena 1 i 0 – ćwiczenie wykonane nieprawidłowo z nietolerowanym lub tolerowanym SPU, należy powtórzyć ćwiczenie szkoleniowe, aż do przejścia ucznia do oceny co najmniej 3; w przypadku dalszych nieprawidłowości i braku poprawy SPU pomimo kilkukrotnego powtórzenia ćwiczenia kontynuowanie szkolenia i podejście do egzaminu uprawniającego nie jest możliwe.

Ocena poprawności wykonania ćwiczenia szkoleniowego zależy całkowicie od instruktora prowadzącego szkolenie lotnicze. W tabeli 6.5 zestawiono przebieg standardowego szkolenia do licencji PPL(A) ze szkoleniem przy użyciu metody SPU. Takie samo zestawienie opracowano również dla szkolenia UAVO.

Proponowana metoda razem z systemem oceniania pozwoli na wcześniejsze wykrycie braków osoby szkolonej i skupienie się instruktora na doskonaleniu konkretnych umiejętności, co będzie powodowało efektywniejsze wykorzystanie godzin szkolenia praktycznego. W niektórych ośrodkach ATO oprócz przeprowadzania *briefingu* (przygotowanie do lotu, w tym czasie załoga sprawdza dokumentację, przygotowuje i oblicza niezbędne dane do przeprowadzenia operacji lotniczej) stosowany jest również tzw. *debriefing*, (odbywany po wykonanej operacji lotniczej) dotyczący parametrów lotu osiągniętych w trakcie wykonywania operacji lotniczej. Następuje wówczas analiza osiągnięć, celem lepszego zrozumienia funkcjonowania statku powietrznego w trakcie wykonywanej operacji oraz lepszego wykorzystania jego możliwości, a także utrzymywania dedykowanych w instrukcji użytkowania parametrów lotu. Dzięki opracowanej metodyce SPU możliwe jest poszerzenie takiej analizy również o aspekt stanu psychofizycznego w trakcie poszczególnych elementów danej operacji lotniczej. Może to znacząco wpłynąć na zrozumienie i zauważenie przez ucznia problematycznych manewrów i nabycia większej pewności i precyzji w ich wykonaniu. Dzięki temu prawdopodobieństwo, że nabyte umiejętności przyszły pilot/operator jest w stanie prawidłowo wykorzystać podczas wykonywania operacji lotniczych zwiększy się.

Tabela 6.5. Zestawienie przebiegu szkolenia standardowego oraz z użyciem proponowanej metody SPU

Szkolenie do licencji PPL(A)	
Szkolenie standardowe	Szkolenie z użyciem metody oceny uczniów
Szkolenie teoretyczne 110 h (40 h wykładów +70 h samokształcenia)	Szkolenie teoretyczne 110 h (40 h wykładów i 70 h samokształcenia)
40 h szkolenia praktycznego	<u>Część I szkolenia praktycznego</u> 15 h szkolenia praktycznego z instruktorem w celu zapoznania się z funkcjonowaniem statku powietrznego oraz jego operowaniem
	Po 15 h wprowadzenie do szkolenia praktycznego metody SPU. W celu kontroli, czy uczeń jest gotowy do samodzielnych lotów szkoleniowych
	<u>Część II szkolenia praktycznego</u> Realizacja 25 h szkolenia praktycznego z użyciem metody oceny ucznia
	W zależności od osiągnięć ucznia rozszerzenie szkolenia o dodatkowe godziny w celu opanowania brakujących umiejętności
5 h lotu na symulatorze lotu	5 h lotu na symulatorze lotów
Szkolenie do świadectwa kwalifikacji UAVO	
Szkolenie teoretyczne 12 h	Szkolenie teoretyczne 12 h
4 h (3 h lotu + 1 h szkolenia naziemnego)	4 h (3 h lotu w powietrzu i 1 h szkolenia naziemnego)
	<u>Część I szkolenia praktycznego</u> 1h szkolenia naziemnego + 1 h szkolenia praktycznego z instruktorem w celu zapoznania się z funkcjonowaniem BSP oraz jego operowaniem
	Po 2 h wprowadzenie do szkolenia praktycznego metody oceny stanu psychofizycznego ucznia. W celu kontroli, czy uczeń jest gotowy do trudniejszych ćwiczeń z użyciem BSP.
	<u>Część II szkolenia praktycznego</u> Realizacja 2 h szkolenia praktycznego z użyciem metody oceny stanu psychofizycznego ucznia-operatora.
	W zależności od osiągnięć kandydata rozszerzenie szkolenia o dodatkowe godziny w celu opanowania brakujących umiejętności

W przypadku, gdy poprzez użycie metody konieczne okaże się rozszerzenie szkolenia praktycznego o dodatkowe godziny (wiąże się to z wykupieniem przez ucznia-pilota dodatkowych godzin lotu) wpłynie to na koszt zdobycia licencji, jednak będzie znaczące dla bezpieczeństwa operacji lotniczych. Dodatkowo zastosowanie metody pozwoli uzyskać pewność, że uczeń jest prawidłowo przygotowany do samodzielnego wykonywania operacji lotniczych.

6.3. Pierwsza próba zastosowania opracowanej metody

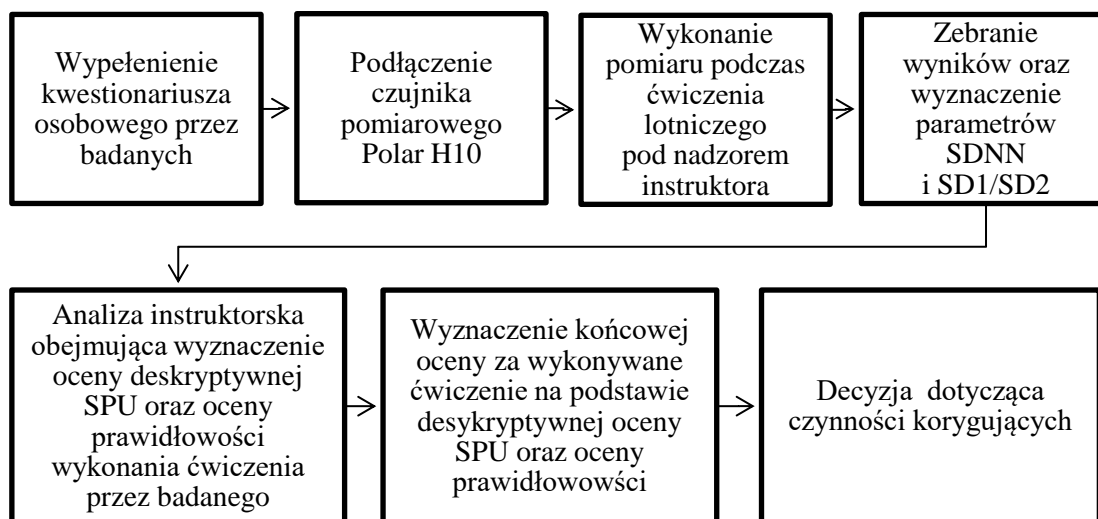
W celu sprawdzenia funkcjonalności proponowanej metody SPU oraz opracowanego modelu, przeprowadzono badania walidacyjne w warunkach szkolenia praktycznego realizowanego w ramach zintegrowanego szkolenia, prowadzonego przez CKL Politechniki Poznańskiej oraz szkolenia praktycznego do świadectwa kwalifikacji UAVO w warunkach zasięgu wzroku, zgodnie ze scenariuszem NSTS-01. Badania

przeprowadzono na 3 uczniach-pilotach (I część badań) oraz 2 uczniach-operatorach (II część badań). Część I badań przeprowadzono na lotnisku w Kąkolewie EPPG. Zrealizowane zostały trzy, trwające około 1 godziny przeloty, wykonane przez różnych uczniów. Uczniowie-piloci wykonywali loty razem z instruktorami. Część II badań, obejmująca loty szkolne kandydatów do uprawnień UAWO została przeprowadzona na Lotnisku Kobylnica EPPK. Uczniowie-operatorzy wykonywali poszczególne ćwiczenia pod nadzorem instruktora. Pomiary wykonano w trakcie realizowania kilku ćwiczeń w trakcie całego szkolenia. W obu częściach badań ochotnikami były osoby spoza grupy badawczej, biorącej udział w badaniach realizowanych w ramach opracowania metody SPU. Krótką charakterystykę grupy badawczej przedstawiono w tabeli 6.6.

Tabela 6.6. Charakterystyka grupy badawczej uczniów-pilotów oraz uczniów-operatorów. Pierwsze użycie metody

Charakterystyka	uczniowie-piloci			uczniowie-operatorzy	
	1P	2P	3P	1O	2O
Nr badanego					
Płeć	M	K	M	M	M
Wiek	20	20	20	21	23
Nalot na samolocie	80	85	60	N/D	N/D
Status w szkoleniu	U-P	U-P	U-P	U-O	U-O

Jak można zauważyć większość grupy badawczej (80%) stanowili mężczyźni (M). W I i II części badania brali udział studenci studiów stacjonarnych na kierunkach prowadzonych przez Politechnikę Poznańską. Grupa badawcza uczniów-pilotów posiadała już doświadczenie w lotach szkolnych, natomiast grupa uczniów-operatorów nie miała żadnego doświadczenia w wykonywaniu operacji Bezzałogowymi Statkami Powietrznymi.



Rys. 6.9. Przebieg badań walidacyjnych [opracowanie własne]

Na podstawie dokonanych pomiarów wyznaczono parametry SDNN oraz SD1/SD2 dla poszczególnych badanych w trakcie wykonywanych przelotów. Wszyscy badani zgodnie z realizowanymi szkoleniami posiadali status ucznia-pilota (U-P) lub ucznia operatora (O-P). Przebieg badań przedstawiono na schemacie (Rys. 6.9).

Część I badań odbywała się przy wykorzystaniu samolotu szkoleniowego Cessna 172S o rejestracji SP-UTD, a część II przy użyciu bezzałogowego statku powietrznego DJI Phantom. W obu częściach badania do wykonania pomiarów wykorzystano pas Polar H10 oraz dedykowaną aplikację do zebrania niezbędnych do oceny stanu psychofizycznego danych.



Rys. 6.2. Aparatura wykorzystana do badań: A) Samolot Cessna 172 S, B) BSP DJI Phantom [opracowanie własne]

Na podstawie zebranych danych wyznaczono parametry SDNN oraz SD1/SD2 (Tab. 6.7), a następnie poproszono instruktorów o ich ocenę w skali od 0 do 5 przy wykorzystaniu opracowanych układów odniesienia.

Tabela 6.7. Wartości parametrów SDNN oraz SD1/SD2 uzyskane przez uczniów

Opis	uczniowie-piloci			uczniowie-operatorzy	
	1P	2P	3P	1O	2O
SDNN	16,984	14,733	12,860	19,642	12,992
SD1/SD2	0,293	0,297	0,182	0,114	0,234

Poszczególne oceny, odpowiadające uczniom przedstawiono w tabeli 6.8.

Tabela 6.8. Oceny przyporządkowane przez instruktorów na podstawie opracowanej skali

Opis	uczniowie-piloci			uczniowie-operatorzy	
	1P	2P	3P	1O	2O
SDNN	2 (w normie)	2 (w normie)	1 (małe)	1 (małe)	1 (małe)
SD1/SD2	2 (w normie)	2 (w normie)	1 (małe)	1 (małe)	2 (w normie)

Kolejno oceny zostały wprowadzone do opracowanego modelu SPU, a poszczególni badani otrzymali oceny deskryptywne przedstawione w tabeli 6.9. Następnie instruktorzy ocenili poprawności wykonanych ćwiczeń. Wszyscy uczniowie-piloci wykonali ćwiczenia prawidłowo, natomiast badany numer 2O z grupy uczniów-operatorów wykonał zadanie nieprawidłowo. Na tej podstawie poszczególnym badanym przyporządkowane oceny końcowe (Tab. 6.9).

W stosunku do uczniów z oceną 5 nie należy wprowadzać do przebiegu szkolenia dodatkowych czynności korygujących. Uczeń-pilot z oceną 3 powinien powtórzyć ćwiczenie szkoleniowe, aż do uzyskania przez niego stanu tolerowanego lub dobrego w trakcie jego wykonywania. W przypadku braku poprawy SPU pomimo kilkakrotnego powtórzenia ćwiczenia, decyzja o kontynuowaniu szkolenia jest zależna od instruktora. Uczeń-operator z oceną 0 powinien powtórzyć ćwiczenie szkoleniowe, aż do przejścia do oceny co najmniej 3. W przypadku dalszych nieprawidłowości i braku poprawy SPU

pomimo kilkukrotnego powtórzenia ćwiczenia kontynuowanie szkolenia i podejście do egzaminu uprawniającego nie jest możliwe.

Tabela 6.9. Poszczególne oceny uzyskane przez badanych

Nr Badanego	Ocena deskryptywna SPU	Ocena prawidłowości	Ocena końcowa ćwiczenia
Uczniowie-piloci			
1P	dobry	prawidłowo	5
2P	dobry	prawidłowo	5
3P	nietolerowany	prawidłowo	3
Uczniowie-operatorzy			
1O	nietolerowany	nieprawidłowo	0
2O	dobry	prawidłowo	5

Proponowana metoda SPU wraz z systemem oceniania pozwoli na wcześniejsze wykrycie problematycznych ćwiczeń dla danego ucznia i skupienie się instruktora na doskonaleniu konkretnych umiejętności. Modyfikacja programu pod indywidualne potrzeby ucznia, spowoduje efektywniejsze wykorzystanie godzin szkolenia praktycznego. Kolejnym elementem niniejszej rozprawy jest sformułowanie zaleceń dla certyfikowanych ośrodków szkolenia lotniczego, celem zwiększania efektywności szkoleń podstawowych lotnictwa ogólnego.

6.4. Sformułowanie zaleceń dla Certyfikowanych Ośrodków Szkolenia Lotniczego ATO

Jednym z elementów niniejszej rozprawy jest przedstawienie sformułowanych zaleceń oraz potencjalnego wpływu opracowanej metody SPU i proponowanego systemu oceniania na efektywność podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego, szczególnie w aspekcie bezpieczeństwa operacji lotniczych. Potencjalny wpływ zostanie oceniony ze względu na aspekt bezpieczeństwa lotów szkoleniowych, który dodatkowo determinuje zasadność wprowadzenia metody do Ośrodków Szkolenia Lotniczego. Na podstawie przeprowadzonych badań, dotyczących pierwszego użycia metody oraz opracowanej propozycji usprawnienia szkoleń podstawowych lotnictwa ogólnego sformułowano następujące zalecenia dla certyfikowanych ośrodków szkolenia lotniczego:

1. Zgłaszanie wszystkich zdarzeń lotniczych występujących w trakcie lotów szkolnych.
2. Monitorowanie zdarzeń lotniczych występujących w trakcie lotów szkolnych, szczególnie tych z instruktorem na pokładzie.
3. Dokładna analiza zaistniałych zdarzeń oraz wprowadzanie działań prewencyjnych.
4. Poszerzenie zagadnień dotyczących czynnika ludzkiego w trakcie realizacji przez uczniów teoretycznej części szkolenia o wiadomości z zakresu świadomości sytuacyjnej i reakcji na zdarzenia niepożądane pojawiające się w trakcie wykonywania operacji lotniczych.
5. **Wdrożenie do praktycznego szkolenia lotniczego obiektywnej metody oceny stanu psychofizycznego ucznia – opracowana metoda SPU.**

6. Wdrożenie do praktycznego szkolenia lotniczego debriefingu, polegającego na analizie z uczniem nie tylko podstawowych parametrów lotu ale również jego stanu psychofizycznego podczas wykonywanych ćwiczeń. Wykorzystując dane z pomiarów przeprowadzonych przy użyciu metody SPU.
7. Umożliwienie wprowadzania przez instruktorów indywidualnych zmian w praktycznej części szkolenia lotniczego – tj. rozszerzenie zakresu godzinowego dla danego ucznia, w przypadku braku pewności, dotyczącej prawidłowości podejmowanych przez niego działań w trakcie operacji lotniczej.
8. Wprowadzenie dodatkowych szkoleń z zakresu świadomości sytuacyjnej oraz obiektywnej oceny predyspozycji ucznia do wykonania ćwiczeń szkoleniowych dla zatrudnionych instruktorów oraz kadry kierowniczej i zarządzającej.

Pierwsze zalecenie dotyczy zgłaszania zdarzeń lotniczych występujących w trakcie lotów szkoleniowych. Zgodnie z analizami ULC i przedstawianymi na konferencjach bezpieczeństwa wynikami, nadal występuje duży problem ze świadomością kadry kierowniczej w ośrodkach szkoleń lotniczych na temat zgłaszania zdarzeń. Kolejne zalecenie związane jest z monitorowaniem tych zdarzeń. Zapisów danych dotyczących danego zdarzenia, rozmowa z uczestnikami zdarzenia, zastanowienie się nad możliwymi przyczynami jego wystąpienia. Zalecenie numer 3 jest znacząco powiązane z drugim i dotyczy podstawowe analizy zaistniałego zdarzenia i zastanowieniu się jakie czynności prewencyjne można wdrożyć, aby w przyszłości uniknąć tego typu zdarzeń. Zalecane jest również prowadzenie rozmów na temat występujących zdarzeń z pracownikami ośrodka oraz innymi uczniami, celem zwiększania świadomości w przypadku zaistniałych w danym zdarzeniu okoliczności. Kolejne zalecenie związane jest z poszerzeniem zakresu wiedzy zdobywanej na teoretycznej części szkolenia lotniczego, dotyczącej *możliwości człowieka*. Zalecane jest rozszerzenie zagadnienia o takie elementy jak: świadomość sytuacyjna i jej poszczególne poziomy oraz stany psychofizyczny pilota w trakcie wykonywania operacji lotniczej. Obecnie w programie szkoleń w module *możliwości człowieka* poruszana jest jedynie tematyka zarządzania zagrożeniami i błędami. Zalecenie numer 5 dotyczy bezpośrednio wdrożenia obiektywnej metody oceny predyspozycji ucznia do wykonania danego ćwiczenia szkoleniowego przez określoną liczbę godzin. Obecnie w programach szkolenia lotniczego ocena predyspozycji ucznia dokonywana jest jedynie na podstawie subiektywnych odczuć instruktora. Zaleca się wdrożenie obiektywnej metody oceny stanu psychofizycznego, aby lepiej określać stan psychofizyczny ucznia i jego predyspozycje do wykonania ćwiczeń szkoleniowych danego dnia. Proponowane jest wdrożenie metody SPU opracowanej w ramach niniejszej rozprawy. Kolejne sformułowane zalecenie związane jest z wprowadzeniem do szkolenia lotniczego nie tylko briefingu, ale również debriefingu, polegającego na analizie z uczniem nie tylko parametrów lotu podczas operacji ale również parametrów jego stanu psychofizycznego. Dzięki opracowanej metodyce SPU możliwe jest poszerzenie debriefingu również o aspekt stanu psychofizycznego w trakcie poszczególnych elementów danej operacji lotniczej. Może to znacząco wpłynąć na zrozumienie i zauważenie przez ucznia problematycznych manewrów i nabycia większej pewności i precyzji w ich wykonaniu. Dzięki temu prawdopodobieństwo, że

nabyte umiejętności przyszły pilot/operator jest w stanie prawidłowo wykorzystać podczas wykonywania operacji lotniczych zwiększy się. Zalecenie numer 7 dotyczy umożliwienia, przez dyrektorów szkoleń lotniczych w danym ośrodku ATO, instruktorom indywidualnego podejścia do danego ucznia i elastycznego rozszerzenia liczby godzin w praktycznej części szkolenia lotniczego w przypadku braku pewności, że wszystkie ćwiczenia wykonywane są z odpowiednią prawidłowością oraz precyzją. Ostatnie zalecenie – numer 8, związane jest z wprowadzeniem szkoleń dla instruktorów oraz kadry kierowniczej danego ośrodka ATO. Dodatkowe szkolenie z zakresu SA oraz obiektywnej oceny predyspozycji pilota zwiększy świadomość instruktorów na temat istotności obiektywnej analizy stanu psychofizycznego i kontroli zachowania ucznia.

Wprowadzenie do ośrodków szkolenia lotniczego sformułowanych zaleceń może przyczynić się do zmniejszenia liczby zdarzeń lotniczych spowodowanych czynnikiem ludzkim. Z pośród wszystkich wypadków samolotów lotnictwa ogólnego, w operacjach niekomercyjnych, około 70% dotyczy lotów szkoleniowych (2021 rok), a kolejne około 20% lotów rekreacyjnych. Stosując sformułowane zalecenia można zmniejszyć ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych w lotach szkoleniowych oraz rekreacyjnych samolotów GA w operacjach niekomercyjnych.

Dodatkowo, analizując sytuację z punktu widzenia Ośrodka Szkolenia Lotniczego przy zastosowaniu proponowanego systemu uczenie będzie bardziej efektywne przede wszystkim pod względem bezpieczeństwa szkoleniowych operacji lotniczych. W przypadku, gdy poprzez użycie metody konieczne okaże się rozszerzenie szkolenia praktycznego o dodatkowe godziny (wiąże się to z wykupieniem przez ucznia-pilota dodatkowych godzin lotu), co również wpłynie na zyski danego ośrodka.

Biorąc pod uwagę przedstawione w niniejszym rozdziale rozważania można stwierdzić, że opracowana metoda SPU razem z dedykowanym system oceniania pozytywnie wpłynie przede wszystkim na bezpieczeństwo operacji niekomercyjnych w lotnictwie ogólnym. Sformułowane zalecenia, tak jak opracowana metoda SPU, razem z propozycją usprawnienia podstawowych szkoleń lotniczych przeznaczone są do stosowania w certyfikowanych ośrodkach szkolenia lotniczego, celem zwiększania efektywności szkoleń lotniczych i wydania do obszaru lotów rekreacyjnych absolwenta przygotowanego do prawidłowego wykonywania operacji lotniczych, świadomego własnych ograniczeń oraz reakcji na poszczególne zdarzenia, mające wpływ na bezpieczeństwo lotów. Po opracowaniu pełnego algorytmu działania wraz z aplikacją i wdrożeniu opracowanej metody do obszaru podstawowych szkoleń lotniczych jej stosowanie będzie bardzo łatwe i wspomże instruktorów w dokonywaniu oceny stanu uczniów przed wykonaniem lotów szkolnych oraz w trakcie. Automatyczne przetworzenie danych oraz uzyskanie konkretnego wyniku w krótkim czasie nie będzie zakłócało przebiegu szkolenia i pozytywnie wpłynie na jego efektywność.

Opracowana metoda SPU wraz z zaleceniami stanowi odpowiedź na liczne problemy i pytania, przedstawione w rozdziale 3 niniejszej rozprawy, które są stawiane przed certyfikowanymi ośrodkami szkoleń lotniczych i może w znaczący sposób wpłynąć na efektywność realizowanych szkoleń.

7. Zakończenie

7.1. Podsumowanie zawartości rozprawy

W polskiej przestrzeni powietrznej można zauważyć co raz większy ruch statków powietrznych w operacjach lotnictwa ogólnego oraz bardzo znaczący przyrost lotów wykonywanych przy użyciu BSP. Na podstawie liczby wydawanych licencji wiadomo, że najdynamiczniej ruch ten rozwija się pod względem samolotów lotnictwa ogólnego, a co z tym związane zwiększa się liczba licencjonowanych pilotów samolotowych turystycznych (PPL(A)). W obszarze lotnictwa ogólnego znacznym problemem jest kwestia zarządzania bezpieczeństwem wykonywanych operacji lotniczych. Pomimo obowiązku korzystania z systemu SMS (ang. *Safety Management System*) występuje ciągły problem ze zgłaszaniem zdarzeń oraz brakiem monitorowania przede wszystkim przez ośrodki szkoleń lotniczych zdarzeń związanych z lotami szkolnymi uczniów-pilotów z instruktorem na pokładzie. Przykładowo najczęściej zgłaszanymi zdarzeniami w szkoleniach do licencji jest twarde lądowanie i uszkodzenie podwozia. Działania mające na celu eliminowanie przyczyn powstawania zdarzeń lotniczych muszą być podejmowane zanim utworzą łańcuch zdarzeń, powodujący wypadek lotniczy. W związku z faktem, iż najwięcej wypadków lotniczych powodowanych jest czynnikiem ludzkim, warto wdrażać czynniki eliminujące już na początku drogi każdego przyszłego pilota. Człowiek jest najsłabszym elementem w lotnictwie ogólnym a ocena jego predyspozycji ciągle pozostaje nieobiektywna. W związku z powyższym zasadne jest aby ośrodki szkoleniowe wprowadzały systemy monitorowania i wspierania bezpieczeństwa, które będą miały wpływ przede wszystkim na zwiększenie efektywności szkolenia. Jednym z takich elementów może być opracowana w ramach rozprawy metoda.

Rozprawa dotyczy zwiększania efektywności podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego. Jako obszar działań wyznaczono szkolenia do licencji pilota turystycznego samolotowego oraz szkolenia do uprawnień na operatora bezzałogowego statku powietrznego w operacjach zgodnych ze scenariuszem NSTS-01. Jednym ze sposobów zwiększania efektywności szkoleń podstawowych mogą być działania wpływające pozytywnie na stan bezpieczeństwa w operacjach lotnictwa ogólnego. Jako przykład takiego działania, stanowiący jednocześnie problem badawczy niniejszej dysertacji, podjęto próbę opracowania obiektywnej metody oceny stanu psychofizycznego uczniów w trakcie podstawowych szkoleń lotniczych oraz zaproponowano jej wdrożenie razem z system oceniania i sformułowano zalecenia dla certyfikowanych ośrodków szkolenia lotniczego.

Na podstawie przeprowadzonych analiz przyjęto cel pracy: **opracowanie metody pozwalającej na zwiększenie efektywności podstawowych szkoleń lotniczych za pomocą oceny stanu psychofizycznego ucznia-pilota/ucznia-operatora.**

Cel pracy został zrealizowany poprzez wykonanie następujących zadań badawczych:

1. Analiza procesu licencjonowania pilotów oraz operatorów w lotnictwie ogólnym ze szczególnym uwzględnieniem licencji pilota turystycznego oraz świadectwa kwalifikacji operatora bezzałogowych statków powietrznych.
2. Analiza dostępnych metod z zakresu monitorowania stanu psychofizycznego człowieka i wybór elementów zastosowanych w opracowanej propozycji (metoda SPU).
3. Przeprowadzenie badań na uczniach-pilotach oraz uczniach-operatorach, celem zebrania danych, dotyczących stanu psychofizycznego osób szkolonych w trakcie wykonywania zadań szkoleniowych.
4. Analiza stanu psychofizycznego uczniów w trakcie wykonywania zadań szkoleniowych wraz z wyznaczeniem układów odniesienia dla poszczególnych parametrów oceny stanu psychofizycznego.
5. Opracowanie metodyki oraz koncepcji badawczej wdrażanej do docelowej metody.
6. Opracowanie obiektywnej metody pozwalającej na zwiększenie efektywności podstawowych szkoleń lotniczych oraz zaproponowanie wdrożenia opracowanego systemu oceniania uczniów.
7. Przeprowadzenie pierwszych badań z użyciem opracowanej metody oraz sformułowanie zaleceń dla ośrodków szkolenia lotniczego w Polsce.

Realizację wyznaczonych zadań badawczych podzielono na dwie części: część teoretyczną i badawczo-analityczną. W części teoretycznej skupiono się na analizie wytycznych do podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego. Istotnym aspektem tego elementu była identyfikacja problemów, które występują w obecnych źródłach prawnych dotyczących programów analizowanych szkoleń lotniczych oraz wskazywanych przez Inspektorat Certyfikacji i Nadzoru, Departamentu Personelu Lotniczego w ULC. W części tej przeprowadzono również analizę dostępnych metod z zakresu oceny niezawodności człowieka w systemie człowiek-maszyna oraz metod oceny stanu psychofizycznego człowieka. Zadanie to było kluczowe w aspekcie doboru metod wykorzystanych w części badawczo-analitycznej.

Główną i najważniejszą część pracy stanowią zadania badawczo-analityczne. W ramach realizacji tego etapu opracowano metodykę badawczą, która pozwoliła na przeprowadzenie badań w warunkach rzeczywistych, dotyczących stanu psychofizycznego uczniów w trakcie wykonywania praktycznych zadań szkoleniowych w szkoleniach podstawowych lotnictwa ogólnego. Kolejno: zebrano grupę badawczą, opracowano przebieg badań oraz dobrano odpowiednią aparaturę badawczą. Zebrane wyniki poddano analizie statystycznej, której efektem było wyznaczenie, niezbędnych do opracowania metody układów odniesienia. Kolejnym i kluczowym etapem rozprawy było przedstawienie końcowej postaci metody, omówienie metodyki przeprowadzania badania stanu psychofizycznego uczniów oraz propozycja modyfikacji podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego o opracowaną metodę SPU oraz przedstawiony system oceniania. Kolejny element rozprawy stanowią badania z pierwszym użyciem opracowanego modelu i metody SPU. Na tym etapie omówiono metodykę badań oraz przedstawiono ich wyniki. Ważnym elementem drugiej części jest również przedstawienie propozycji usprawnienia podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego oraz sformułowanie zaleceń dla ośrodków szkolenia lotniczego w Polsce.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

1. Identyfikację problemów występujących w podstawowych szkoleniach lotnictwa ogólnego, realizowanych w certyfikowanych ośrodkach szkolenia lotniczego ATO.
2. Wielokryterialny dobór metody do przeprowadzenia badań w warunkach rzeczywistych.
3. Przeprowadzenie badań w warunkach rzeczywistych, dotyczących stanu psychofizycznego uczniów w trakcie praktycznej części szkolenia lotniczego.
4. Analizę stanu psychofizycznego uczniów oraz wyznaczenie parametrów i układów odniesienia, określających stan psychofizyczny.
5. Próbę obiektywizacji oceny ucznia w trakcie szkolenia lotniczego, której efektem jest opracowanie realywnie prostej metody oceny stanu psychofizycznego uczniów.
6. Zaproponowanie modyfikacji szkoleń podstawowych lotnictwa ogólnego przy użyciu opracowanej metody SPU oraz systemu oceniania.
7. Sformułowanie zaleceń docelowo stosowanych w Certyfikowanych Ośrodkach Szkolenia Lotniczego ATO, celem zwiększania efektywności szkoleń lotnictwa ogólnego.

7.2. Wnioski końcowe

Przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy badania oraz analizy pozwalają na opracowanie następujących wniosków końcowych:

1. W wytycznych do programów szkoleń oraz egzaminów w lotnictwie ogólnym występują problemy, dotyczące głównie zależności oceny predyspozycji uczniów do wykonania poszczególnych ćwiczeń opartej na całkowicie subiektywnej ocenie instruktora.
2. W lotnictwie komercyjnym istnieje rodzaj szkolenia lotniczego, w którym oceniane są podstawowe kompetencje i predyspozycje na podstawie analizy behawioralnej (zachowania) pilotów, prowadzone przez specjalnie przeszkolonych instruktorów. W lotnictwie ogólnym brak jest stosowania systemów ocen opartych na analizie behawioralnej danego ucznia.
3. Zgodnie z zawartością niniejszej rozprawy istnieje wiele metod oceny stanu psychofizycznego człowieka, jednak do badania stanu psychofizycznego uczniów w trakcie praktycznych szkoleń lotniczych odpowiednie będą metody obiektywne. Pod względem dostosowania do warunków panujących w kokpicie oraz ergonomii wykonywania ćwiczeń najbardziej użyteczne są pomiary oparte na pracy układu sercowo-naczyniowego.
4. Parametrami najlepiej określającymi stan psychofizyczny uczniów, na podstawie pomiaru pracy układu sercowo-naczyniowego są zmienne opisujące częstotliwość rytmu serca HRV. Ze względu na istotność wyników najbardziej przydatne są zmienne pochodzące z analizy czasowej oraz nieliniowej.
5. Na podstawie przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy badań oraz analiz statystycznych prawdziwe jest stwierdzenie, iż możliwe jest wyznaczenie zakresów wartości (układów odniesienia) parametrów HRV, charakterystycznych dla stanu psychofizycznego uczniów w trakcie praktycznego szkolenia lotniczego.
6. Przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy badania oraz analizy pozwalają stwierdzić, iż opracowana metoda SPU umożliwia przeprowadzenie oceny stanu

psychofizycznego uczniów w trakcie praktycznej części szkolenia lotniczego całkowicie nieinwazyjnie.

7. Wykorzystanie do opracowania metody logiki rozmytej i wprowadzenie opisu deskryptywnego jako oceny stanu psychofizycznego ucznia powoduje, że metoda jest przejrzysta i czytelna oraz łatwa w stosowaniu dla instruktorów szkolenia lotniczego, a jej wynik jednoznaczny.
8. Opracowana metoda razem z wdrożonym system oceniania oraz sformułowanymi zaleceniami stanowi narzędzie, które w znaczny sposób ułatwi instruktorowi dokonanie oceny uczniów w trakcie szkolenia lotniczego.
9. Zaproponowany system oceniania, którego jedną ze składowych jest wynik uzyskany z wdrożonej metody SPU, zawiera proste wytyczne, pomocne instruktorom w trakcie szkolenia lotniczego, które w znacznym stopniu ograniczają subiektywizm oceny predyspozycji oraz umiejętności uczniów-pilotów oraz uczniów-operatorów.
10. Wyniki przeprowadzonych pierwszych badań z użyciem proponowanej metody razem z systemem oceniania, potwierdzają zasadność stosowania przedstawionych w ramach opracowanej dysertacji wytycznych.

Rozważania teoretyczne oraz analityczne w niniejszej rozprawie pozwalają stwierdzić, że wdrożenie opracowanej metody SPU oraz proponowanego systemu oceniania wpłynie pozytywnie na efektywność podstawowych szkoleń lotnictwa ogólnego przede wszystkim w aspekcie bezpieczeństwa operacji lotniczych. Wdrożenie zaproponowanych zmian może doprowadzić do zwiększenia poziomu jakości szkoleń lotnictwa ogólnego, co jest odpowiedzią na dotychczasowe oceny i monitorowanie szkoleń przez Inspektorat Certyfikacji i Nadzoru Departament Personelu Lotniczego.

7.3. Kierunki dalszych prac

W ramach badań oraz analiz przeprowadzonych w niniejszej rozprawie oraz opracowanych wniosków możliwe jest wyznaczenie następujących kierunków dalszych prac:

1. Opracowanie aplikacji wykorzystującej przedstawioną metodę oraz proponowany system oceniania uczniów i wdrożenie jej w kilku Certyfikowanych Ośrodkach Szkolenia Lotniczego ATO w Polsce.
2. Rozszerzenie metody również o pomiar przy użyciu metod elektroencefalografii oraz eye tracking'u, celem zwiększenia kompleksowości opracowanej metody.
3. Rozszerzenie grupy badawczej uczniów i ewentualna korekta wyznaczonych układów odniesienia dla wybranych parametrów, charakteryzujących stan psychofizyczny uczniów-pilotów oraz uczniów-operatorów.
4. Rozszerzenie grupy badawczej również o uczniów innych szkoleń lotniczych np. do uprawnień SPL oraz BSP w warunkach BVLOS.

Pierwszym krokiem w dalszym rozwoju tematyki rozprawy jest opracowanie aplikacji, która spełniałaby wszystkie założenia metody oraz uwzględniała opracowany model SPU. Wprowadzenie dedykowanego do metody oprogramowania znacznie ułatwi i zdecydowanie usprawni korzystanie z metody SPU, a wyniki będą dostępne już w momencie ukończenia ćwiczenia przez danego ucznia. Analizowanie stanu psychofizycznego ucznia-pilota lub ucznia-operatora bezpośrednio po zakończeniu

ćwiczenia umożliwi natychmiastowe podejmowanie działań związanych z dalszą realizacją praktycznego szkolenia lotniczego.

Następnym kierunkiem prac jest rozszerzenie zastosowania metody o inne szkolenia lotnicze, nadal pozostając w obszarze lotnictwa ogólnego. Dokonane w części teoretycznej pracy, analizy obecnej sytuacji dotyczącej wypadków i poważnych incydentów, występujących w trakcie szkoleń lotniczych, wskazują na konieczność zainteresowania wspomnianym obszarem, zwłaszcza w aspekcie jakości szkoleń lotniczych. Zastosowanie metody również do innych szkoleń będzie mogło znacząco wpłynąć na bezpieczeństwo operacji lotnictwa ogólnego i ograniczyć występowanie zdarzeń niepożądanych w trakcie lotów szkoleniowych i instruktorskich.

Kolejny z kierunków dalszych prac może okazać się ważnym elementem zwiększania efektywności działania opracowanej metody. Im więcej osób zostanie przebadanych, tym lepiej dobrane będą układy odniesienia stosowane w metodzie. Dzięki większej próbie badawczej, możliwa będzie ewentualna korekta układów odniesienia lub ich prawidłowość zostanie potwierdzona przez większą grupę ludzi. Takie wyniki mogą okazać się dodatkowym argumentem, przemawiającym za zastosowaniem metody w Certyfikowanych Ośrodkach Szkolenia Lotniczego ATO.

Rozszerzenie prac możliwe jest także w aspekcie zastosowania innych metod obiektywnych oceny stanu psychofizycznego człowieka. W ramach analizy wielokryterialnej poza pracą układu sercowo-naczyniowego, kolejnymi metodami, nadającymi się do badań w warunkach rzeczywistych praktycznego szkolenia lotniczego są elektroencefalografia oraz eye tracking. Wprowadzenie tych dwóch metod do opracowanej metodyki i uwzględnienie wyników pomiarów w opracowanym modelu SPU pozwoli stworzyć kompleksowy i niepodważalny system oceny uczniów w trakcie praktycznego szkolenia lotniczego, znacząco zwiększający jego efektywność w zakresie bezpieczeństwa.

Literatura

1. Aeroklub Polski, Program szkolenia samolotowego do licencji PPL(A), [online], Dostęp z dnia: 06.08.2021, Warszawa 2010.
2. Alaimo A., Esposito A., Orlando C., Simoncini A., Aircraft Pilots Workload Analysis: Heart Rate Variability Objective Measures and NASA-Task Load Index Subjective Evaluation, *Aerospace* 2020, 7(9), 137, <https://doi.org/10.3390/aerospace7090137>.
3. Alba G., Jaime V., Rey B., Montoya P., Munoz A., M., The Relationship Between Heart Rate Variability and Electroencephalography Functional Connectivity Variability Is Associated With Cognitive Flexibility, Published in *Frontiers in Human Neuroscience* on February 25, 2019, <https://doi.org/10.3389/FNHUM.2019.00064>.
4. Andrychowicz-Trojanowska A., Basic terminology of eye-tracking research. *Applied Linguistics Papers*, 123-132, 2018.
5. Andrychowicz-Trojanowska A., Parametry okoruchowe ucznia szybko czytającego. *Applied Linguistics Papers*, 89-105, 2018.
6. Antonenko P., Paas F., Grabner R., Van Gog T., 2010. Using electroencephalography to measure cognitive load. *Educ. Psychol. Rev.* 22 (4), 425–438.
7. Babusiak B., Borikn S., Gala M., Prerequisite for HRV biofeedback: Real-Time Detection of R peaks, proceedings of 19th International Conference Computational problems of Electrical Engineering (IEEE), New York, NY10017. 2018 USA.
8. Biernacki M., Zieliński A., Analiza psychometryczna polskiego przekładu narzędzia do subiektywnej oceny obciążenia zadaniowego NASA-TLX. *Polski Przegląd Medycyny Lotniczej*, 16(3), p. 219-239, 2010
9. Błażejczyk-Majka L., Zastosowanie analizy skupień w przypadku zmiennych wyrażonych na skali porządkowej, *StatSoft Polska*, 2018.
10. Bowo L. P., Furusho M. (2019). Usability of Human Error Assessment and Reduction Technique with a 4M framework (HEART– 4M) – A Case Study on Ship Grounding Accidents. *Journal of ETA Maritime Science*, 7(4), 266-279, <https://dx.doi.org/10.5505/jems.2019.54775>.
11. Boyd D. D., Scharf M., Cross D., A comparison of general aviation accidents involving airline pilots and instrument-rated private pilots, *Journal of Safety Research*, 76(2021), 127-134, <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.11.009>.
12. Cao X., MacNaughton, P., Cadet, L., Cedeno-Laurent J., Flanigan S., Vallarino J., Allen J. (2019). Heart Rate Variability and Performance of Commercial Airline Pilots during Flight Simulations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2), 237, <https://doi.org/10.3390/ijerph16020237>.
13. Carrasco-Poyatos M., González-Quílez A., Martínez-González-Moro I., Granero-Gallegos A., HRV-guided training for professional endurance athletes: A protocol for a cluster-randomized controlled trial, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17, 5465, 2020, <https://doi.org/10.3390/ijerph17155465>.
14. Causse M., Baracat B., Pastor J., Reward and Uncertainty Favor Risky Decision-Making in Pilots: Evidence from Cardiovascular and Oculometric Measurements. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 36, 231–242 (2011), <https://doi.org/10.1007/s10484-011-9163-0>.
15. Cenk A., Güler T., Beşikçi E.B., Implementation of ARAMIS methodology in the risk assessment of chemical tankers: The case of loading operation, *Ocean Engineering*, Volume 261, 2022, 112211, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112211>.
16. Cessna 172S Skyhawk dla CKL Politechniki Poznańskiej, [online], dostęp z dnia 10.07.2022, Dostępne: <https://dlapilota.pl/wiadomosci/gb-aircraft/nowa-cessna-172s-skyhawk-dla-ckl-politechniki-poznanskiej-0>

17. Charakterystyka floty Aeroklubu Ziemi Lubuskiej (AZL) [online]. Dostęp z dnia 10.07.2022, dostępne: <https://osl.azl.pl/flota/>
18. Cierpiałkowska L., Soroko E., Zaburzenia osobowości. Problemy diagnozy klinicznej, Wydawnictwo UAM, Poznań 2014, ISBN 978-83-232-2698-7.
19. Cohen M.X., Analyzing Neural Time Series Data: Theory and Practice. MIT press, 2014.
20. Colombari V., Bello G. C., The human factors in risk analyses of process plants: The control room operator model 'TESEO. Reliability Engineering 1 (1980): 3-14.
21. Duchowski A., Eye Tracking Methodology. Theory and Practice, Wydawnictwo Springer, ISBN-13: 9781846286087, 2007.
22. Dziennik Urzędowy Urzędu Lotnictwa Cywilnego nr 19 z dnia 3 listopada 2010 r., Wspólne wymagania lotnicze. JAR-FSTD A. Samolotowe Szkoleniowe Urządzenia Symulacji Lotu. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Warszawa, 2010, [online], Dostęp z dnia 02.02.2022.
23. Dziennik Urzędowy Urzędu Lotnictwa Cywilnego, Wytyczne nr 25 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego w sprawie sposobów wykonywania operacji przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych w związku z wejściem w życie przepisów rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) nr 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych, 30 grudnia 2020r. [online], Dostęp z dnia 02.02.2022.
24. Dziennik Urzędowy, Wytyczne nr 10 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 16 lipca 2020 r. w sprawie ogłoszenia akceptowalnych sposobów potwierdzania spełnienia wymagań oraz materiałów zawierających wytyczne do części MED do rozporządzenia komisji (UE) nr 1178/2011. [online], Dostęp z dnia 02.02.2022
25. Dziennik Urzędowy, Wytyczne Nr 15 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-01 dla operacji w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) lub z widokiem z pierwszej osoby (FPV), wykonywanych z użyciem bezzałogowego statku powietrznego o masie startowej mniejszej niż 4 kg, Urząd Lotnictwa Cywilnego, 2020. [online], Dostęp z dnia 02.02.2022.
26. Eilebrecht B., Wolter S., Lem J., Linder H., Vogt R., Walter M., Leonhardt S., The Relevance of HRV Parameters for Driver Workload Detection in Real World Driving, 2012 Computing in cardiology (CINC), VOL 39, p. 409-412, 2012.
27. Eye tracking. The complete pocket guide. [online]. Dostęp z dnia: 15.12.2020, Dostępne: <https://imotions.com/blog/eye-tracking>.
28. Eyetracking 101: How does it work? [online]. Dostęp z dnia: 15.12.2020, Dostępne: <https://assistivetechblog.com/2016/08/eye-tracking-101-how-does-it-work.html>,
29. Farcasiu M., Constantinescu C., Evaluation of human factor engineering influence in nuclear safety using probabilistic safety assessment techniques, Kerntechnik, vol. 86, no. 6, 2021, pp. 470-477. <https://doi.org/10.1515/kern-2020-0062>.
30. Faucett M., Using the Human Error Assessment and Reduction technique to Predict and Prevent Catheter Associated Urinary Tract Infections, Master thesis, Department of Industrial Engineering, Kansas State University, 2017.
31. Fellner R., Jafernik H., Prawo i procedury lotnicze, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2015, ISBN: 978-83-7880-227-3.
32. Galant M., Merkisz J., Fuć P., Przegląd metod pomiaru obciążenia zadaniowego operatora w badaniach z wykorzystaniem symulatorów, Logistyka 2015 (3), 3188-3194.
33. Galant M., Ograniczanie ryzyka zagrożeń w lotnictwie ogólnym przez zastosowanie systemu monitorującego stan psychofizyczny pilota. Rozprawa Doktorska, Politechnika Poznańska, [online], Dostęp z dnia: 04.04.2021 Poznań, 2017.

34. Główny Ośrodek Badań Lotniczo-Lekarskich, Zakres Badań Lotniczo-Lekarskich, [online], Dostęp z dnia: 4.03.2022, http://gobll.pl/?page_id=357.
35. Harrison Ch., Stow J., Ge X., Gregory J., Gibson H., Monk A., At the limit? Using operational data to estimate train driver human reliability, *Applied Ergonomics*, Volume 104, 2022, 103795, ISSN 0003-6870, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103795>.
36. IATA Evidence-Based Training Implementation Guide, 2013 [online], Dostęp z dnia 02.02.2022, <https://www.iata.org/contentassets/632cceb91d1f41d18cec52e375f38e73/ebt-implementation-guide.pdf>.
37. Ibrahim A., Surya R., The Implementation of Simple Additive Weighting (SAW) Method in Decision Support System for the Best School Selection in Jambi, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1338 (2019) 012054, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1338/1/012054>.
38. Ilków A., Czynniki ludzkie w systemie bezpieczeństwa ruchu lotniczego. *Prace Instytutu Lotnictwa*, 99-119, 211, 2011.
39. Iqbal M.U., Shahabb M.A., Choudharya M., Srinivasanb B., Srinivasan R., Electroencephalography (EEG) based cognitive measures for evaluating the effectiveness of operator training, *Process Safety and Environmental Protection* 150(2021), 51-67, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.050>.
40. Jak zmierzyć ruch oka. [online], Dostęp z dnia 02.02.2022, Dostępne: <https://monovision.com/aktualnosci/jakzmierzyc-ruch-oka/>, Date available: 28.12.2020.
41. Joint aviation Authorities, JAR-FCL 1 - FLIGHT CREW LICENSING (Aeroplane) z 1 grudnia 2006 roku, Holandia 2006.
42. Kałużna E., Fellner A., Metody uwzględniania czynnika ludzkiego w zarządzaniu bezpieczeństwem systemu transportu lotniczego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, 103, 99-111, Styczeń 2014.
43. Karkowski G., Kuniewicz M., Ząbek A., Bednarek A., Lelakowski J., Rhythm with wide QRS - difficulty in interpreting, *Folia Cardiologica* 2015, tom 10, nr 2, strony 122–126, DOI: 10.5603/FC.2015.0020.
44. Klem G.H., The ten-twenty electrode system of the international federation. The international federation of clinical neurophysiology. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. Suppl.* 52, 3–6.
45. Kobiałka, E., Ćwiklak, J., Goś, A. (2022). Experimental and Numerical Investigations of Bird Models for Bird Strike Analysis. *Energies* 15, 3699, <https://doi.org/10.3390/en15103699>.
46. Konferencja Bezpieczeństwa w Lotnictwie Cywilnym 2018, Zadania PKBWL, [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022, <https://www.ulc.gov.pl/pl/zarzadzanie-bezpieczenstwem/kultura-i-promocja-bezpieczenstwa/konferencje-bezpieczenstwa-w-lotnictwie-cywilnym/4421-konferencja-bezpieczenstwa-lotow-lotnictwa-cywilnego-rok-2018>
47. Konferencja Bezpieczeństwa w Lotnictwie Cywilnym 2019, Zadania PKBWL, [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022, <https://www.ulc.gov.pl/pl/zarzadzanie-bezpieczenstwem/kultura-i-promocja-bezpieczenstwa/konferencje-bezpieczenstwa-w-lotnictwie-cywilnym/4645-podsumowanie-konferencji-bezpieczenstwa-w-lotnictwie-cywilnym-rok-2019>
48. Konferencja Bezpieczeństwa w Lotnictwie Cywilnym 2021, Zadania PKBWL i ich ewolucja, [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022, <https://www.ulc.gov.pl/pl/zarzadzanie-bezpieczenstwem/kultura-i-promocja-bezpieczenstwa/konferencje-bezpieczenstwa-w-lotnictwie-cywilnym/5774-konferencja-bezpieczenstwa-w-lotnictwie-cywilnym-2021>
49. Konwencja o Międzynarodowym Lotnictwie Cywilnym, podpisana w Chicago dnia 7 grudnia 1944 r. (Dz. U. z dnia 26 czerwca 1959 r.)

50. Kosmowski K.T., Human reliability analysis in the context of accident scenarios, *Journal of KONBiN* 3(6) 2008, ISSN 1895-8281.
51. Kozuba J., Czynniki ludzkie jako zasadniczy element bezpieczeństwa w szkoleniach lotniczych, Warsztaty General Aviation, Politechnika Śląska, 2022 [online], Dostęp z dnia 12.10.2022, Dostępne: <https://ulc.gov.pl/pl/aktualnosci/5961-podsumowanie-warsztatow-dla-general-aviation-prezentacje>.
52. Kukuła A., Wirkus M., Metody wielokryterialne wspomaganie decyzji oraz ich zastosowanie w opracowaniu metody oceny niepotokowych procesów produkcyjnych, *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*. Tom I, 612-623, 2017.
53. Kurniawan H., Maslov A.V., Pechenizkiy M., Stress Detection from Speech and Galvanic Skin Response Signals, *IEEE* 2013.
54. Lasota M., Czynniki ludzkie w wybranych modelach powstawania wypadków lotniczych. *Obronność. Zeszyty Naukowe*, Tom 3, 27, strony 72-97, 2018.
55. Li P., Li X., Zhang L., Dai L., A validation research on fuzzy logic-AHP-based assessment method of operator's situation awareness reliability. *Safety Science*, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.007>.
56. Lorenz B., Biella M., Teegen U., Stelling D., Wenzel J., Jakobi J., Korn B., Performance, situation awareness, and visual scanning of pilots receiving onboard taxi navigation support during simulated airport surface operation. *Human Factors and Aerospace Safety*, 6, 135–154, 2006.
57. Luo H., Wei J., Yasin Y., Wu S.J., Barszczyk A. Feng Z.-P. Lee K. Stress Determined through Heart Rate Variability Predicts Immune Function 2019, Vol.26, No. 4, October 2019, *Neuroimmunomodulation* 2019;26:167–173 <https://doi.org/10.1159/000500863>.
58. Łazowska E., Niezgoda M., Kruszewski M., Obciążenie poznawcze kierowców, *Transport samochodowy*, nr 2, 2014, 73-82.
59. Maciejewska M., Galant M., Kardach M., An example of the implementation HEART method's in assessing the reliability of General Aviation pilots, *Proceedings of 23rd International Scientific Conference. Transport Means* 2019.
60. Makarowski R., *Ryzyko i stres w lotnictwie sportowym*, wyd. Difin, Warszawa, 2010.
61. Makarowski R., Smolicz T., *Czynniki ludzkie w operacjach lotniczych*. Kosowizna, 2012.
62. Malik M., Huikuri H., Lombardi F., Schmidt G., The purpose of heart rate variability measurements, *Clinical Autonomic Research* on June 01, 2017, doi.org/10.1007/S10286-017-0416-8.
63. Mansikka H., Simola P., Virtanen K., Harris D., Oksama L., Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during instrument approaches, *Ergonomics*, 59:10, 1344-1352, 2016, <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1136699>.
64. Mansikka H., Virtanen K., Harris D., Simola P., Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during an instrument flight rules proficiency test, *Applied ergonomics*, Volume 56, p. 213-219, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.04.006>.
65. Mansikka, H., Harris, D., Virtanen, K., Pilot competencies as components of a dynamic human-machine system. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 29(6), 466–477, 2019, <https://doi.org/10.1002/hfm.20809>.
66. Marszałkiewicz J., Transport lotniczy, jako element logistyki, *Czasopismo Logistyka* 6/2014, strony 14440-14447, 2014.
67. Martins A., A Review of Important Cognitive Concepts in Aviation. *Aviation*, 20, 2016.
68. Mather M., Thayer J. F., How heart rate variability affects emotion regulation brain networks, *Current Opinion in Behavioral Sciences* on February 01, 2018, <https://doi.org/10.1016/J.COBEHA.2017.12.017>.

69. Merkisz J., Galant M., Bieda M., 2017, Analysis of operating Instrument Landing System accuracy under simulated conditions, *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transp.*, vol. 94, pp. 163–173.
70. Mika B., Maciejewska M., Galant-Gołębiowska M., Analysis of the impact of task difficulty on the operator's Workload level, *Aviation*, 2022, 26(2): 72–78, <https://doi.org/10.3846/aviation.2022.16808>.
71. Ministerstwo Infrastruktury, Lotnictwo Ogólne, [dostęp online: 04.03.2022], <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/lotnictwo-ogolne>.
72. Mohanavelu K., Poonguzhali S., Ravi D., Cognitive Workload Analysis of Fighter Aircraft Pilots in Flight Simulator Environment, *Defence Science Journal*, Vol. 70, No. 2, March 2020, pp. 131-139, <https://doi.org/10.14429/dsj.70.14539>.
73. Muller-Putz G.R., Electroencephalography, *Handbook of Clinical Neurology*, Vol. 168 (3rd series) Brain-Computer Interfaces, 2020, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63934-9.00018-4>.
74. Nakasone, A., Prendinger, H., Ishizuka, M. Emotion Recognition from Electromyography and Skin Conductance, In *Proc. BSI 2005*, 219-222.
75. Nourbakhsh N., Wang Y., Chen F., Calvo R.A., Using Galvanic Skin Response for Cognitive Load Measurement in Arithmetic and Reading Tasks, In *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference (OzCHI '12)*. Association for Computing Machinery, New York, USA, 420–423, 2012, <https://doi.org/10.1145/2414536.2414602> 2012.
76. Obora H., Metoda analizy błędów pracownika w układzie ergonomicznym HRA, *Zeszyty Naukowe nr 648 Akademii Ekonomicznej w Krakowie*, 2004.
77. Oferta szkoleń i cennik DRON.edu.pl [online], Dostęp z dnia: 10.07.2022, Dostępne: <https://dron.edu.pl/sklep/>
78. Oferta szkoleń i cennik Smart Aviation [online], Dostęp z dnia: 10.07.2022, Dostępne: <https://www.smartaviation.eu/szkolenia/>
79. Olpiński W., Niezawodność człowieka w systemie sterowania ruchem kolejowym, *Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 173*, 2016.
80. Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego, Doc 9995 Manual of Evidence-based Training, 2013, [online], Dostęp z dnia 02.02.2022, <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3177.pdf>.
81. Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego, Załącznik 1 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym. Licencjonowanie personelu, Wyd. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Warszawa, 2011.
82. Pačaiová H., Tomašková M., Balážiková M., Krajňák J. Analysis of air-traffic threats. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2021, 110, 143-155. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.110.>, 12.
83. Paglioni V.P., Groth K. M., Dependency definitions for quantitative human reliability analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 220, 2022, 108274, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108274>.
84. Peißl S., Wickens C., Baruah R., Eye-Tracking Measures in Aviation. A Selective Literature Review, *The International Journal of Aerospace Psychology*, 28:3-4, 98-112, 2018.
85. Polak E, Slugaj R., Gardzinska, Postural Control and Psychophysical State Following of Flight Simulator Session in Novice Pilots. *Front. Public Health*, 2022, 10:788612. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.788612>.
86. Polska Agencja Żeglugi Powietrznej (PANSZA), Podsumowanie ruchu lotniczego General Aviation w 2020 roku, [online], Dostęp z dnia: 06.06.2022, <https://www.pansa.pl/podsumowanie-ruchu-lotniczego-general-aviation-w-2020-r/>

87. Polska Agencja Żeglugi Powietrznej (Pansa), Podsumowanie ruchu lotniczego General Aviation w 2021 roku, [online], Dostęp z dnia: 06.06.2022, <https://www.pansa.pl/podsumowanie-ruchu-lotniczego-general-aviation-w-2021-r/>
88. Putra D. W. T., Punggara A. A., Comparison analysis of Simple Additive Weighting (SAW) and Weigthed Product (WP) in decision support systems, MATEC Web of Conferences 215, 01003, 2018, <https://doi.org/10.1051/matecconf/201821501003>.
89. Rahim R., Study Approach of Simple Additive Weighting For Decision Support System, Volume 3, Issue 3, ISSN: 2395-6011, Online ISSN: 2395-602X, Themed Section: Science and Technology, 2017.
90. Ramezani A., Nazari T., Rabiee A., Hadad K., Faridafshin M., Human error probability quantification for NPP post-accident analysis using Cognitive-Based THERP method. Progress in Nuclear Energy, 123, 103281, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103281>.
91. Read K., Charles R., Understanding teamwork errors in Royal Air Force air traffic control. Safety Science, 109, 36–45, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.030>.
92. Rozporządzenie delegowane Komisji UE 2019/945 w sprawie przepisów i procedur, dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych z dnia 12 marca 2019.
93. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1178/2011 z dnia 3 listopada 2011 r. ustanawiające wymagania techniczne i procedury administracyjne odnoszące się do załóg w lotnictwie cywilnym zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 216/2008, Komisja Europejska, 2011.
94. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 20 grudnia 2018 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wyłączenia zastosowania niektórych przepisów ustawy - Prawo lotnicze do niektórych rodzajów statków powietrznych oraz określenia warunków i wymagań dotyczących używania tych statków, Warszawa 2018.
95. Rozporządzenie wykonawcze Komisji UE 2019/947 w sprawie przepisów i procedur, dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych z dnia 24 maja 2019.
96. Sarter N.B., Mumaw R.J., Wickens Ch.D., Pilots' monitoring strategies and performance on automated flight decks: An Empirical Study Combining Behavioral and Eye-Tracking Data, Human Factors, Vol. 49, No. 3, June 2007, pp. 347–357. <https://doi.org/10.1518/001872007X196685>.
97. Scanella S., Peysakhovich V., Ehrig F., Assessment of ocular and physiological metrics to discriminate flight phases in Real Light Aircraft, Human Factor: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Volum: 6, Issue: 7, pages: 922-9935, 2018, <https://doi.org/10.1177/0018720818787135>.
98. Sensor tętna POLAR H10, [online], dostęp z dnia 06.07.2021. Dostępne: <https://www.polar.com/pl/sensors/h10-heart-rate-sensor>.
99. Shaffer F., Ginsberg JP., An overview of heart rate variability metrics and norms. Front Public Health. 2017 Sep 28;5:258. doi: 10.3389/fpubh.2017.00258. PMID: 29034226; PMCID: PMC5624990.
100. Sharma M., Sudhanshu K., Sharma M., A biref introduction and review on galvanic skin response, International Journal od Medical Reserach Professionals, 2016, <https://doi.org/10.21276/ijmrp>.
101. Siennicka A., Quintana D. S., Fedurek P., Wijata A., Paleczny B., Ponikowska B., Danel D.P., Resting heart rate variability, attention and attention maintenance in young adults. Int J Psychophysiol. 2019 Sep;143:126-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.06.017>. Epub 2019 Jun 27. PMID: 31255739.
102. Skowron M., Laboratorium: komputery w sterowaniu, Laboratorium 1. Układy logiki rozmytej [online], Dostęp z dnia 10.07.2022. Dostępne: <http://staff.iiar.pwr.wroc.pl/marek.skowron/FuzzyLogic/Lab1.pdf>

103. Socha V., Socha L., Hanakova L., Valenta V., Kusmirek S., Lalis A., Pilots' performance and workload assessment: transition from analogue to Glass-Cockpit, *Appl. Sci.* 2020, 10(15), 5211; <https://doi.org/10.3390/app10155211>.
104. Šplíchal M., Reduction in the pilot's stress during the landing maneuver by providing accurate height information, 13th Research and Education in Aircraft Design Conference 2018 Brno, Czech Republic, 7th – 9th November 2018, <https://doi.org/10.13164/conf.read.2018.3>.
105. Stolecka-Makowska A., Wolny R., Możliwości zastosowania techniki okulograficznej w ilościowych badaniach marketingowych, *Studia Ekonomiczne / Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach*, 195, 197-205, 2014.
106. Su Y., Gao X., Qian H., Su X., Handling Uncertainty in Human Cognitive Reliability Method for Safety Assessment Based on DSET. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 132(1), 201–214, 2022, <https://doi.org/10.32604/cmcs.2022.020541>.
107. Sugiono S., Widhayanuriyawan D., Andriyani D., Mental Stress Evaluation of Car Driver in Different Road Complexity Using Heart Rate Variability (HRV) Analysis, *ICBRA '18*, December 27–29, 2018, Hong Kong, DOI: <https://doi.org/10.1145/3309129.3309145>.
108. Szrama S., Gill A., Aircraft operators maintenance decisions supporting method, *Archives of Transport*, 2021, vol. 59, no. 3, s. 93-111, DOI: 10.5604/01.3001.0015.0466
109. Trzaskalik T., Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Przegląd metod i zastosowań, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i Zarządzanie* z. 74 Nr kol. 1921, 2014.
110. Tsang P.S., Can pilots time-share better than non-pilots?, *Applied Ergonomics* 1986, 17.4, 284-290, *Ergonomics in aviation*, 0003-6870/86/04 0284-07
111. Urząd Lotnictwa Cywilnego, 100 lat Lotnictwa w Polsce. Okolicznościowy Biuletyn Urzędu Lotnictwa Cywilnego, nr 5(6)/2018, [online], Dostęp z dnia: 06.06.2022.
112. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Rejestr Personelu Lotniczego, Raport ilości ważnych licencji na dzień 31 grudnia 2021. Wyd. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Warszawa, 2021, [online], Dostęp z dnia: 06.06.2022.
113. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Rejestr Personelu Lotniczego, Raport: licencje wydane po raz pierwszy w roku kalendarzowym 2021, [online], Dostęp z dnia: 06.06.2022. Wyd. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Warszawa, 2021.
114. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Sprawozdanie o stanie bezpieczeństwa lotniczego za rok 2017, 2018 [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022, https://ulc.gov.pl/_download/bezpieczenstow_lotow/analizy/Sprawozdanie_o_stanie_be_zpieczenstwa_lotnictwa_cywilnego_za_rok_2017_v1.pdf.
115. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Sprawozdanie o stanie bezpieczeństwa lotniczego za rok 2020, 2021 [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022, https://ulc.gov.pl/images/LBB/Sprawozdanie_o_stanie_bezpiecze%C5%84stwa_lotnictwa_cywilnego_za_rok_2020.pdf.
116. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Sprawozdanie o stanie bezpieczeństwa lotniczego za rok 2018, 2019 [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022, https://ulc.gov.pl/_download/bezpieczenstow_lotow/kultura-promocja-bezpieczenstwa/Sprawozdanie_o_stanie_bezpieczenstwa_lotnictwa_cywilnego_za_rok_2018_v1.pdf.
117. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Sprawozdanie o stanie bezpieczeństwa lotniczego za rok 2019, 2020 [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022, https://www.ulc.gov.pl/_download/bezpieczenstow_lotow/analizy/Sprawozdanie_2019.pdf

118. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Często zadawane pytania, [online], Dostęp z dnia 06.07.20221, Dostępne: <https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/czesto-zadawane-pytania-faq>
119. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Krajowy Plan Bezpieczeństwa 2020-2023, Warszawa, 2020, [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022.
120. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Krajowy Plan Bezpieczeństwa 2021-2024, Warszawa, 2021, [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022.
121. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Krajowy Program Bezpieczeństwa w Lotnictwie Cywilnym 2020, Warszawa, 2020, [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022.
122. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Wytyczne nr 16 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 15 października 2016, Załącznik 1, Akceptowalne sposoby potwierdzania spełnienia wymagań (AMC) oraz materiały zawierające wytyczne (GM) do Part - FCL, 15 grudnia 2011, [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022.
123. Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. (Dz.U. 2002 Nr 130 poz. 1112), Prawo Lotnicze. Warszawa, Kancelaria Sejmu, 2002, [online], Dostęp z dnia: 04.03.2022.
124. Vicente J., Laguna P., Bartra A., Bailon R., Detection of Driver's Drowsiness by Means of HRV Analysis, Computing in Cardiology Conference, Volume 38, Page 89-92, ISSN 2325-8861, 2011.
125. Wang X., Zhang J., Feng P., Yu D., Wu Z., A Safety Monitoring System for Unmanned Aerial Vehicles. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering-CSAE, 2018, <https://doi.org/10.1145/3207677.3278103>.
126. Wąsikowska B., Eye tracking w badaniach marketingowych, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Studia Informatica 36(863), 2015, <https://doi.org/10.18276/si.2015.36-13>
127. Williams J.C.: HEART – A Proposed Method for Achieving High Reliability in Process Operation by Means of Human Factors Engineering Technology, Safety and Reliability, The Journal of Safety and Reliability Society, Volume 35, Issue 3, 2015.
128. Wilson G. F. An Analysis of Mental Workload in Pilots During Flight Using Multiple Psychophysiological Measures. The International Journal of Aviation 12, 1, 3-18, 2019.
129. Wolny M., Znaczenie informacji międzykryterialnej we wspomaganie podejmowania wielokryterialnych decyzji, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i Zarządzanie z. 86, Nr kol. 1946, 2015.
130. Wu Y., Gu, R., Yang O., Luo Y., How Do Amusement, Anger and Fear Influence Heart Rate and Heart Rate Variability?, Frontiers in Neuroscience on October 18, 2019, <https://doi.org/10.3389/FNINS.2019.01131>.
131. Xu Z., Petrunin I., Tsourdos A., Sabyasachi M. and Williamson A., Cognitive Communication Scheme for Unmanned Aerial Vehicle Operation, The 2019 International Workshop on Research, Education and Development on Unmanned Aerial Systems (RED-UAS 2019), Cranfield University, Cranfield, UK.
132. Zdarzenia lotnicze na świecie w GA, The 32nd Joseph T. Nall Report, AOPA, [online], dostep z dnia 20.09.2022, dostępne: <https://www.aopa.org/training-and-safety/air-safety-institute/accident-analysis/joseph-t-nall-report/nall-report-figure-view?category=all&year=2020&condition=all&report=true>
133. Żyłuk, A.; Kuźma, K.; Grzesik, N.; Zieja, M.; Tomaszewska, J. Fuzzy Logic in Aircraft Onboard Systems Reliability Evaluation—A New Approach. *Sensors* 2021, 21, 7913. <https://doi.org/10.3390/s21237913>

ZAŁĄCZNIK I

ANKIETA DLA UCZNIÓW-OPERATORÓW

1. Czy posiada Pani/Pan uprawnienia lotnicze?

TAK

NIE

2. Jeśli tak to jaką?

3. Czy gra Pani/pan w gry komputerowe typu RPG?

TAK

NIE

4. Jeśli tak, to jak często?

Codziennie

4 razy w tygodniu

2 razy w tygodniu

1 raz w tygodniu

2-3 razy w miesiącu

Rzadziej

Kiedyś zdarzało mi się grać

5. Czy w celu grania w gry typu RPG używa Pani/Pan gamepad'a?

TAK

NIE

6. Czy korzysta Pani/Pan z różnego typu symulatorów (lotu/jazy itp.)?

TAK

NIE

7. Jeśli tak, to jak często?

Codziennie

4 razy w tygodniu

2 razy w tygodniu

1 raz w tygodniu

2-3 razy w miesiącu

Rzadziej

Kiedyś zdarzało mi się grać

8. Jak ocenia Pani/Pan swoją szybkość reakcji?

- Bardzo dobrze
- Dobrze
- Przeciętnie
- Źle
- Bardzo źle

9. Jak ocenia Pani/Pan swoje zdolności poznawcze?
(postrzeganie, uwaga, rozumowanie, pamięć)

- Bardzo dobrze
- Dobrze
- Przeciętnie
- Źle
- Bardzo źle

10. Czy na co dzień jest Pani/Pan nerwowy?

- Tak, bardzo często
- Zdarza mi się
- Nie jestem nerwowa/y

11. Jak bardzo jest Pani/Pan zmotywowany do uzyskania licencji operatora BSP?
(Jeśli posiada Pani/Pan licencję proszę pominąć pytanie).

- Bardzo zmotywowana/y
- Potrzebuje do wykonywania pracy
- Nie zależy mi

12. Do jakiej grupy wiekowej Pani/Pan należy?

- 50 i więcej
- 46-49
- 40-45
- 35-39
- 30-34
- 25-29
- 24 i mniej

ANKIETA DLA UCZNIÓW-PILOTÓW

1. Jaka jest Pani/Pana płeć

- Kobieta
- Mężczyzna
- Nie chcę podać

2. Do jakiej grupy wiekowej Pani/Pan należy?

- 50 i więcej
- 40-49
- 36-40
- 31-35
- 26-30
- 21-25
- 18-20
- 18 i mniej

3. Czy na co dzień uprawia Pani/pan jakiś sport?

- TAK
- NIE

4. Jeśli tak, to jak często?

- Raz w tygodniu
- 2 razy w tygodniu
- 3-4 razy w tygodniu

5. Jakie posiada Pani/Pan uprawnienia lotnicze?

- Uczeń-pilot
- LAPL(A)
- PPL(A)
- CPL(A)
- ATPL(A)
- SPL
- BPL
- UAVO
- Inne

6. Jaka jest Pani/Pana liczba wylatanych godzin jako pilot/uczeń-pilot?

7. Czy podczas praktycznej części szkolenia lotniczego zdarzało się, że Pani/Pan tracił/a orientację geograficzną?
- TAK
 NIE
8. Czy podczas praktycznej części szkolenia lotniczego zdarzało się, że Pani/Pan doświadczał/a złego samopoczucia? (mdłości, ból głowy, zaburzenia widzenia)
- Tak, często
 Zdarzyło się
 Nie
9. Czy czuje się Pani/Pan dobrze przygotowany do wykonywania lotów samodzielnych?
- TAK
 NIE
10. Ile godzin lotów samodzielnych będzie/było wykonywane w trakcie Pani/Pana szkolenia lotniczego?
- 1-4 godzin
 4-8 godzin
 8-10 godzin
 10-12 godzin
 12 godzin i więcej
11. Czy podczas Pani/Pana praktycznego szkolenia lotniczego będą/były ćwiczone sytuacje awaryjne w warunkach rzeczywistych lub symulatorowych?
- Tak, w warunkach rzeczywistych
 Tak, w warunkach symulatorowych
 Tak, zarówno w warunkach rzeczywistych i symulatorowych
 Nie