

**Uniwersytet Kaliski im. Prezydenta Stanisława
Wojciechowskiego**

Wydział Medyczny i Nauk o Zdrowiu

mgr inż. Przemysław Wojciechowski

**Psychofizjologiczne reakcje i czynniki ryzyka choroby
symulatorowej u pilotów szkolonych w środowisku
wirtualnej rzeczywistości**

*Psychophysiological reactions and risk factors for simulator sickness in pilots trained in
a virtual reality environment*

Rozprawa doktorska

Praca doktorska wykonana pod kierunkiem:

Promotor: prof. dr hab. n. med. Jan Błaszczyk

Promotor pomocniczy: dr inż. Konrad Wojtowicz

Kalisz, 2026

Streszczenie

Wraz ze wzrostem popularności i dostępności symulatorów w różnych dziedzinach życia, w tym w szkoleniu pilotów statków powietrznych (zarówno załogowych, jak i bezałogowych – UAV), odnotowano występowanie niepożądanych skutków ubocznych określanych mianem konfliktu sensorycznego (ang. sensory conflict) lub choroby symulatorowej (ang. simulator sickness). Choroba symulatorowa objawia się dolegliwościami zbliżonymi do choroby lokomocyjnej, takimi jak nudności, zawroty głowy, senność, oszołomienie, zmęczenie, ból głowy i trudności ze skupieniem, ale jest wywołana iluzją ruchu (vection), a w konsekwencji konfliktem przedsiolkowo-wzrokowym, a nie rzeczywistym ruchem.

Celem badań była ocena prawdopodobieństwa wystąpienia choroby symulatorowej oraz jej wpływu na efektywność szkolenia pilotów wojskowych i cywilnych, a także zbadanie obiektywnych reakcji psychofizjologicznych, w szczególności odpowiedzi autonomicznego układu nerwowego (AUN), u pilotów UAV podczas wykonywania misji o zróżnicowanym poziomie trudności. Przegląd literatury miał na celu usystematyzowanie pojęć związanych z konfliktem sensorycznym oraz identyfikację najbardziej adekwatnych, obiektywnych wskaźników do jego prognozowania.

Przeprowadzono trzy główne badania/analizy:

1. Badanie ankietowe 48 pilotów (32 wojskowych i 16 cywilnych) różnych typów statków powietrznych. Wykorzystano ankietę wzorowaną na Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) do subiektywnej oceny stanu psychofizycznego po sesjach w wirtualnej rzeczywistości.
2. Badanie obiektywne 14 operatorów UAV w wieku 26–31 lat, wykorzystujące symulator wyścigowych dronów FPV. Gromadzono dane biomedyczne za pomocą sensora elektrokardiograficznego (EKG/HRV) oraz sensora oddechu PZT, mierzono także czas reakcji wzrokowo-ruchowej (RT) po zakończeniu misji o niskiej, średniej i wysokiej trudności.
3. Przegląd literatury (lata 2014–2023) dotyczący konfliktu sensorycznego i wykorzystania biosensorów do predykcji objawów.

Wyniki i Wnioski

Jako wnioski z analizowanych publikacji zidentyfikowano cztery główne czynniki wpływające na wystąpienie choroby symulatorowej: wiek badanej osoby, zróżnicowanie misji, rodzaj statku powietrznego i podatność na chorobę lokomocyjną. Inne czynniki zwiększające prawdopodobieństwo zachorowania to: przeziębienie, leki, niedobór snu i ogólne zmęczenie. Około 2/3 ankietowanych uległo zmęczeniu podczas sesji symulatorowych. Szczególne nasilenie objawów zaobserwowano wśród pilotów szkolonych na samolotach bojowych.

Udowodniono, że symulator lotu bezpośrednio indukuje bodźce stresowe, które powodują aktywację współczulnej części układu nerwowego. Odpowiedź AUN wzrasta proporcjonalnie do poziomu trudności misji. W misjach o wysokiej trudności średni interwał RR (meanRR) był o 16.9% krótszy (859 ms) niż w misjach o niskiej trudności (1004.03 ms). Czas reakcji wzrokowo-ruchowej był szybszy po misjach o wysokiej trudności (209 ms), co sugeruje utrzymywanie się stanu pobudzenia sympatycznego.

Analiza dostępnej literatury wskazuje, że objawy konfliktu sensorycznego są bezpośrednio związane z obecnością stresu. Najbardziej obiecującymi obiektywnymi wskaźnikami do wykrywania choroby symulatorowej są aktywność bioelektryczna mózgu (EEG) (zwłaszcza częstotliwości beta i theta) oraz elektrokardiografia (EKG).

Dodatkowymi wnioskami z przeprowadzonych badań jest znikomy poziom wiedzy na temat choroby symulatorowej u pilotów, ponieważ aż 37 z 48 badanych nie znało nawet samego pojęcia choroby symulatorowej, a także możliwość wykorzystania reakcji organizmu na stres do optymalizacji szkolenia pilota poprzez autonomiczne sterowanie poziomem wykonywanej misji.

Słowa kluczowe: wirtualna rzeczywistość, symulator lotu, ankieta choroby symulatorowej, biosensory, choroba symulatorowa, choroba wirtualnej rzeczywistości, autonomiczny układ nerwowy

Abstract

With the growing popularity and availability of simulators in various areas of life, including the training of aircraft pilots (both manned and unmanned – UAV), undesirable side effects known as sensory conflict or simulator sickness have been reported. Simulator sickness manifests itself in symptoms similar to motion sickness, such as nausea, dizziness, drowsiness, confusion, fatigue, headache, and difficulty concentrating, but it is caused by the illusion of movement (vection) and, consequently, vestibular-visual conflict, rather than actual movement.

The aim of the study was to assess the likelihood of simulator sickness and its impact on the effectiveness of military and civilian pilot training, as well as to examine objective psychophysiological responses, in particular the autonomic nervous system (ANS) response, in UAV pilots during missions of varying degrees of difficulty. The literature review aimed to systematize concepts related to sensory conflict and identify the most adequate, objective indicators for its prediction.

Three main studies/analyses were conducted:

1. A survey of 48 pilots (32 military and 16 civilian) of various types of aircraft. A questionnaire modeled on the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) was used for subjective assessment of psychophysical condition after virtual reality sessions.
2. An objective study of 14 UAV operators aged 26–31, using an FPV racing drone simulator. Biomedical data were collected using an electrocardiographic sensor (ECG/HRV) and a PZT breath sensor, and visual-motor reaction time (RT) was measured after completing missions of low, medium, and high difficulty.
3. A review of the literature (2014–2023) on sensory conflict and the use of biosensors to predict symptoms.

Results and conclusions

Four main factors influencing the occurrence of simulator sickness were identified from the analyzed publications: the age of the test subject, mission diversity, aircraft type, and susceptibility to motion sickness. Other factors that increase the likelihood of illness include colds, medications, sleep deprivation, and general fatigue. Approximately two-thirds of respondents experienced fatigue during simulator sessions. Particularly severe symptoms were observed among pilots trained on combat aircraft.

It has been proven that flight simulators directly induce stress stimuli that activate the sympathetic nervous system. The AUN response increases in proportion to the difficulty level of the mission. In high-difficulty missions, the mean RR interval (meanRR) was 16.9% shorter (859 ms) than in low-difficulty missions (1004.03 ms). The visual-motor reaction time was faster after high-difficulty missions (209 ms), suggesting a persistent state of sympathetic arousal.

An analysis of the available literature indicates that the symptoms of sensory conflict are directly related to the presence of stress. The most promising objective indicators for detecting simulator sickness are brain bioelectrical activity (EEG) (especially beta and theta frequencies) and electrocardiography (ECG).

Additional conclusions from the study include the negligible level of knowledge about malingering among pilots, as 37 out of 48 respondents were not even familiar with the concept of malingering, as well as the possibility of using the body's response to stress to optimize pilot training through autonomous control of the mission level.

Key words: virtual reality, flight simulator, Simulator Sickness Questionnaire, biosensors, simulator sickness, virtual reality sickness, autonomic nervous system

Wykaz publikacji stanowiących pracę doktorską:

Publikacja 1

P. Wojciechowski, J. Błaszczuk, "Simulator sickness in the aircraft training of military and civil pilots of various types of aircraft." *Med Pr Work Health Saf.* 2019;70(3):317-325. doi:10.13075/mp.5893.00766.

MNiSW: 70 pkt

IF: 0,9

Udział w publikacji: 80%

Publikacja 2

P. Wojciechowski, K. Wojtowicz, J. Błaszczuk, "Effect of unmanned aerial vehicle mission difficulty level on pilot's autonomic nervous system." *Int J Occup Med Environ Health.* 2025. doi:10.13075/ijomeh.1896.02630. *MNiSW: 100 pkt*

IF: 1,4

Udział w publikacji: 80%

Publikacja 3

P. Wojciechowski, K. Wojtowicz, J. Błaszczuk, "Sensory conflict in simulator sessions – measuring biosignals to predict the onset of disorderly symptoms: a brief literature review." *Int J Occup Med Environ Health.* 2024;37(5):482-494. doi:10.13075/ijomeh.1896.02410.

MNiSW: 100 pkt

IF: 1,4

Udział w publikacji: 80%

Suma punktów z listy czasopism punktowanych MNiSW: 270

Suma punktów Impact Factor: 3,7

Wykaz skrótów

- AUN - Autonomic Nervous System (Układ Nerwowy Autonomiczny)
- Bpm - Beats Per Minute (Uderzeń na minutę)
- EKG - Electrocardiogram (Elektrokardiogram)
- EMG - Electromyography (Elektromiografia)
- EEG - Electroencephalogram (Elektroencefalogram)
- FFS – Full Flight Simulator (Symulator typu Full Flight)
- FPV - First-Person View (Widok z pierwszej osoby)
- GSR - Galvanic Skin Response (Galwaniczna Odpowiedź Skórna)
- HRV - Heart Rate Variability (Zmienność Częstotliwości Tętna)
- maxRR - Maximum RR Interval (Maksymalny Interwał RR)
- meanHR - Mean Heart Rate (Średnia Częstotliwość Tętna)
- meanRR - Mean RR Interval (Średni Interwał RR)
- minRR - Minimum RR Interval (Minimalny Interwał RR)
- MSAQ - Military Stress and Anxiety Questionnaire (Kwestionariusz Stresu i Lęku Wojskowego)
- PZT - Piezo-Electric Respiration
- rMSSD - Root Mean Square of Successive Differences (Pierwiastek Kwadratowy Średniej Zróżnicowania Sukcesywnych Interwałów)
- RR20 - RR Interval - Określenie ilości interwałów RR, które mają różnicę większą niż 20 ms, często używane w analizie zmienności tętna.
- pRR20 - Percentage of RR Intervals - Procent interwałów RR, które mają różnicę większą niż 20 ms, używane do analizy zmienności tętna.
- RR50 - RR Interval Określenie ilości interwałów RR, które mają różnicę większą niż 50 ms.
- pRR50 - Percentage of RR Intervals - Procent interwałów RR, które mają różnicę większą niż 50 ms.
- SS – Simulator Sickness (Choroba Symulatorowa)
- SSQ - Simulator Sickness Questionnaire (Kwestionariusz Choroby Symulatorowej)
- VRS - Virtual Reality Sickness (Choroba Ruchu w Wirtualnej Rzeczywistości)
- UAV - Unmanned Aerial Vehicle (Bezzałogowy Pojazd Powietrzny)
- VR - Virtual Reality (Wirtualna Rzeczywistość)

Spis treści

<i>Wstęp</i>	10
<i>1. Cel pracy i hipotezy badawcze</i>	11
<i>2. Materiał i metody badawcze</i>	13
<i>3. Syntetyczne omówienie publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej</i>	15
<i>3.1. Publikacja 1</i>	15
<i>3.2. Publikacja 2</i>	18
<i>3.3. Publikacja 3</i>	20
<i>4. Wnioski</i>	23
<i>5. Spis piśmiennictwa</i>	25

Wstęp

W ciągu ostatnich 20 lat można zaobserwować znaczny wzrost wykorzystania symulatorów w różnych dziedzinach życia, włączając w to szkolenie pilotów statków powietrznych, kierowców i operatorów różnego sprzętu, a także szeroko dostępną rozrywkę w wirtualnej rzeczywistości (VR). Wraz ze wzrostem popularności i dostępności symulatorów, a także ze zwiększeniem ich wykorzystania, zauważono pojawianie się licznych efektów ubocznych tej technologii. Zagrożeniem dla użytkowników jest występowanie choroby symulatorowej (ang. *simulator sickness*) oraz choroby wirtualnej rzeczywistości (ang. *virtual reality sickness*), które łącznie określa się mianem konfliktu sensorycznego. Badania nad chorobą symulatorową mają długą historię, sięgającą już lat 50. XX wieku, kiedy to piloci korzystający z pierwszych symulatorów lotu zgłaszali niepożądane objawy psychofizyczne [1,2].

Objawy choroby symulatorowej są zbliżone do dolegliwości związanych z chorobą lokomocyjną, obejmując m.in. nudności, wymioty, zawroty głowy, zmęczenie, dezorientację przestrzenną oraz ograniczenie zdolności koncentracji. Należy jednak zaznaczyć, że zasadniczą różnicą między chorobą lokomocyjną a symulatorową jest mechanizm ich powstawania. Choroba lokomocyjna jest wywołana rzeczywistym ruchem, podczas gdy choroba symulatorowa powstaje w wyniku iluzji ruchu. Najpowszechniejsza teoria głosi, że objawy te są wynikiem konfliktu przedsionkowo-wzrokowego, gdy informacje docierające do ośrodkowego układu nerwowego z narządu wzroku, błędniaka i proprioceptorów są niezgodne ze statycznością symulatora i świadomością bezruchu użytkownika [1-3].

Wraz ze wzrostem liczby bezzałogowych statków powietrznych (ang. Unmanned Aerial Vehicle - UAV) i złożonością wykonywanych przez nie misji, wzrosła również potrzeba zrozumienia reakcji psychofizjologicznych w organizmach pilotów UAV. W tym kontekście, kluczowe stało się zbadanie odpowiedzi autonomicznego układu nerwowego (AUN) na bodźce generowane przez symulację. AUN, podzielony na część współczulną i przywspółczulną, odgrywa istotną rolę w reakcji na stres, podejmowaniu decyzji i funkcjonowaniu poznawczym.

Ponadto, w literaturze [4] zauważa się, że wpływ symulatora lotu na stan psychofizyczny pilotów statków załogowych jest dobrze zbadany, natomiast brakuje badań ukierunkowanych na pilotów UAV, a w szczególności na reakcję ich AUN na bodźce symulacyjne o różnym poziomie trudności misji. Analiza dostępnych [5] badań na temat konfliktu sensorycznego wskazuje również na konieczność dalszych, bardziej kompleksowych badań nad jego dokładnym charakterem i przyczynami, z uwzględnieniem obiektywnych pomiarów biosygnatów.

Niniejsza praca ma na celu ocenę szerokiego spektrum psychofizjologicznych reakcji organizmu w środowisku wirtualnej rzeczywistości, koncentrując się zarówno na subiektywnych odczuciach pilotów wojskowych i cywilnych, jak i na obiektywnych pomiarach fizjologicznych pilotów UAV.

1. Cel pracy i hipotezy badawcze

Celem głównym pracy była ocena psychofizjologicznych reakcji organizmu oraz identyfikacja czynników ryzyka wystąpienia choroby symulatorowej u pilotów szkolonych w środowisku wirtualnej rzeczywistości, z uwzględnieniem wpływu poziomu trudności zadań, rodzaju statku powietrznego i indywidualnych predyspozycji. Praca miała charakter interdyscyplinarny, łącząc elementy fizjologii, medycyny pracy oraz inżynierii biomedycznej.

W ramach celów szczegółowych dokonano oceny:

1. częstości i nasilenia objawów choroby symulatorowej u pilotów wojskowych, cywilnych i operatorów bezzałogowych statków powietrznych (UAV).
2. zmian w funkcjonowaniu autonomicznego układu nerwowego (parametry EKG, HRV, oddech) w trakcie zadań symulatorowych o różnym poziomie złożoności.
3. związku między poziomem trudności misji symulatorowej a reakcjami stresowymi i sprawnością psychofizyczną pilotów.
4. indywidualnych czynników ryzyka (wiek, doświadczenie, podatność na chorobę lokomocyjną, stan zdrowia, zmęczenie) sprzyjających wystąpieniu objawów choroby symulatorowej.

oraz opracowano:

5. model predykcyjnego wystąpienia objawów choroby symulatorowej z wykorzystaniem analizy biosygnatów i danych subiektywnych (ankiety SSQ, testy reakcji).
6. rekomendacje profilaktyczne i edukacyjne w zakresie ograniczania negatywnych skutków ekspozycji na środowisko symulatorowe w szkoleniu pilotów.

Aby osiągnąć cel główny pracy zastosowano integrację metod subiektywnych (ankiety SSQ, identyfikacja czynników ryzyka, ocena wpływu rodzaju statku powietrznego) oraz metod obiektywnych (analiza biosygnatów EKG/HRV/PZT, ocena reakcji AUN, pomiary czasu reakcji), co pozwoliło na kompleksową ocenę psychofizjologiczną pilotów w środowisku wirtualnej rzeczywistości. Badania te dostarczyły dowodów na to, że poziom trudności zadań i rodzaj statku powietrznego są istotnymi modyfikatorami reakcji na symulację.

Hipotezy badawcze

Zakłada się, że

1. istnieje odwrotna korelacja między wiekiem pilota a jego podatnością na chorobę symulatorową,

2. zwiększone zróżnicowanie misji, wyższe prędkości, zwiększona liczba manewrów lub loty na niskiej wysokości (typowe dla pilotów wojskowych) zwiększają podatność pilota na chorobę symulatorową i nasilenie jej objawów
3. rodzaj statku powietrznego, którego lot jest symulowany, wpływa na nasilenie objawów choroby symulatorowej,
4. wzrost poziomu trudności misji w symulatorze lotu bezzałogowego statku powietrznego (UAV) jest skorelowany z aktywacją współczulnej części autonomicznego układu nerwowego,
5. zwiększenie poziomu trudności misji w symulatorze skutkuje skróceniem (przyspieszeniem) wizualno-motorycznego czasu reakcji pilota,
6. aktywność serca (mierzone EKG), zmienność oddechowa (mierzona poprzez PZT) oraz szybkość reakcji wzrokowo-ruchowej, obiektywnymi wskaźnikami podatności badanych na zjawisko konfliktu sensorycznego/choroby symulatorowej,
7. w celu zapewnienia spójności i wiarygodności wyników badań konieczne jest opracowanie ustandaryzowanych protokołów i procedur do przeprowadzania testów podatności na chorobę symulatorową, włączając w to miary fizjologiczne (EKG, HRV, PZT) obok subiektywnych kwestionariuszy.

Problem badawczy

Problematyka badawcza koncentruje się na kompleksowej analizie sposobów (poprzez jakie mechanizmy fizjologiczne i psychofizyczne) wpływu stopnia złożoności lub trudności misji wykonywanej w symulatorze lotu (w szczególności lotów wysokomanewrowych i UAV) na aktywację autonomicznego układu nerwowego (AUN) pilotów oraz nasileniem u nich subiektywnych i obiektywnych objawów konfliktu sensorycznego, a także, jak można wykorzystać obiektywne dane z biosensorów (EKG, HRV, PZT, RT) do automatycznego dostosowywania poziomu trudności w celu optymalizacji szkolenia.

Pytania badawcze

1. Jakie czynniki środowiskowe, demograficzne i indywidualne predyspozycje pilotów determinują prawdopodobieństwo wystąpienia i nasilenie objawów choroby symulatorowej?
2. W jaki sposób poziom trudności misji w symulatorze lotu Bezzałogowego Statku Powietrznego (UAV) wpływa na aktywację i balans Autonomicznego Układu Nerwowego (AUN) pilota?
3. Jakie obiektywne biosygnaly mogą służyć do przewidywania i diagnostyki Konfliktu Sensorycznego i jakie są przyszłe kierunki optymalizacji szkolenia lotniczego?

2. Materiał i metody badawcze

W przytoczonych badaniach wykorzystano zarówno metody ilościowe oparte na danych subiektywnych (ankieta), jak i metody ilościowe oparte na obiektywnych pomiarach psychofizjologicznych (biosygnaly), a także przegląd literatury w celu systematyzacji wiedzy.

Badania Pilotów Wojskowych i Cywilnych

Grupa badawcza: Badanie objęło 48 pilotów różnych typów statków powietrznych: 32 pilotów wojskowych i 16 cywilnych. Średnia wieku mieściła się w przedziale 30–35 lat. Piloci kierowali samolotami wysokomanewrowymi (15 osób), śmigłowcami (17 osób), samolotami pasażerskimi (13 osób) oraz ultralekkimi (3 osoby). Badani posiadali ważne orzeczenia lotniczo-lekarskie.

Metoda Subiektywna: Wykorzystano ankietę przygotowaną w oparciu o Simulator Sickness Questionnaire (SSQ). Ankiety były wypełniane po szkoleniach z wykorzystaniem symulatorów, a ich celem była subiektywna ocena stanu psychofizycznego. Ankieta zawierała pytania dotyczące częstości występowania 13 objawów (np. zmęczenie, ból głowy, utrata orientacji) oraz możliwych przyczyn tych objawów (np. choroba, zmęczenie, leki).

Symulacja: Wykorzystano symulatory projekcyjne (FFS) z pełnowymiarową repliką kokpitu i systemem wizualizacji o wysokiej rozdzielczości. Czas trwania sesji był zróżnicowany. Piloci wojskowi wykonywali bardziej skomplikowane misje (przechwytywanie, manewry, sytuacje awaryjne), natomiast cywilni skupiali się na lotach na podstawie przyrządów i podejściach do lądowania.

Badania Operatorów Bezzałogowych Statków Powietrznych (UAV)

Grupa badawcza: Badanie przeprowadzono na grupie 14 mężczyzn, operatorów UAV, w wieku 26–31 lat (średnia wieku 27,1 roku). Uczestnicy mieli wcześniejsze doświadczenie w pilotażu dronów FPV w symulatorze Liftoff. Wykluczono osoby przyjmujące leki lub spożywające alkohol przed testem.

Symulacja: Wykorzystano symulator wyścigowych dronów FPV — Liftoff. Wybrano trzy profile tras o różnym poziomie trudności (niski, średni, wysoki). Pilot miał za zadanie przelecieć przez wszystkie punkty kontrolne najszybciej, jak to możliwe.

Metody Obiektywne (Biosygnaly):

- EKG i HRV: Zbieranie danych biomedycznych odbywało się za pomocą zestawu BITalino PsychoBIT, wykorzystującego sensor elektrokardiograficzny (ECG). Analizowano parametry zmienności rytmu serca (HRV), w tym w dziedzinie czasu (minRR, maxRR, meanRR, meanHR, SDRR, rMSSD, RR20, pRR20, RR50, pRR50) oraz w dziedzinie częstotliwości (LF [%], HF [%], TOTAL power, LF/HF).

- Oddech (PZT): Użyto piezoelektrycznego sensora oddechu (PZT), umieszczonego w elastycznej opasce na klatce piersiowej. Mierzono częstotliwość oddechu (RESP FREQ).
- Czas Reakcji (RT): Po zakończeniu każdej sesji symulatorowej, pilot pięciokrotnie wykonywał test czasu reakcji wzrokowo-ruchowej (Visual-motor RT).

Przegląd Literatury na temat Konflikty Sensorycznego

Metodologia Przeglądu: Przeanalizowano publikacje z lat 2014–2023 dostępne w bazach PubMed, Elsevier i MDPI, koncentrując się na słowach kluczowych związanych z chorobą symulatorową, *cybersickness* i konfliktem sensorycznym.

Cel Przeglądu: Zestawienie najnowszych doniesień dotyczących różnych typów konfliktu sensorycznego w odniesieniu do czynników objawowych w przewidywaniu i diagnozie, w szczególności z uwzględnieniem obiektywnych wskaźników (biosensorów).

3. Syntetyczne omówienie publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

3.1. Choroba symulatorowa w szkoleniu pilotów wojskowych i cywilnych różnych typów statków powietrznych (Publikacja 1)

Symulatory są ważną częścią szkolenia lotniczego. Umożliwiają doskonalenie umiejętności w warunkach niesprzyjającej pogody, pozorują niebezpieczne sytuacje w przestrzeni, nie narażając ani statków powietrznych, ani zdrowia i życia samych pilotów. Czy choroba symulatorowa wpływa na szkolenie pilotów? Niewątpliwie stanowi ona przeszkodę, ale możliwą do pokonania; jej skutki można co najmniej zminimalizować. Wystąpienie objawów, które byłyby wskazaniem do zakończenia treningu, zdarza się niezwykle rzadko. Wszystkie osoby biorące udział w badaniu ukończyły swoją sesję. Negatywny wpływ choroby symulatorowej na efektywność szkolenia lotniczego nie jest więc duży. Biorąc pod uwagę zalety – bezpieczeństwo pilota i maszyny, redukcję kosztów, trening wielu wersji zdarzeń, oraz to, że ewentualne niedogodności nie zagrażają trwale zdrowiu, można stwierdzić, że szkolenie symulatorowe jest potrzebne i jak na razie niezastąpione. Oczywiście należy się zastanowić, czy obecnie, przy tak powszechnym dostępie do wirtualnej rzeczywistości, wobec zwiększonej liczby użytkowników nie pojawią się kolejne, poważniejsze objawy choroby symulatorowej. Ocena procesów zachodzących w organizmie podczas konfliktu przedsiolkowo-wzrokowego jest niezwykle złożona i zależy od indywidualnych predyspozycji użytkowników symulatorów. Ponadto oszacowanie możliwości wystąpienia choroby symulatorowej u pilotów cywilnych i wojskowych nie jest proste. Wpływa na to szereg czynników. Od pilotów wojskowych wymaga się większej odporności na sytuacje stresogenne, pracy w każdych warunkach pogodowych, ale również wykonywania lotów na małej wysokości przy dużych prędkościach, co sprzyja występowaniu objawów choroby. Piloci cywilni ćwiczą loty z punktu A do punktu B bez zbędnego manewrowania, przez co ich profil lotu jest spokojniejszy, wykonywany przy mniejszej prędkości i większej odległości od ziemi. Otrzymują, jak już podano, więcej informacji z przyrządów pomiarowych znajdujących się w kokpicie niż z systemu wizualizacji sytuacji przestrzennej. W związku z tym mniejsza była ich podatność na chorobę symulatorową. Co więcej, biorący udział w badaniu piloci samolotów pasażerskich byli najbardziej doświadczoną grupą, co mogło zwiększyć ich odporność na negatywny wpływ rzeczywistości wirtualnej. Choroba symulatorowa pozostaje jednak w dużej mierze indywidualnym odczuciem, nikomu nie udało się więc dotąd udowodnić, że pilot wojskowy będzie ją znosił lepiej niż pilot cywilny i odwrotnie. W literaturze [6] omawia się badania, według których wraz ze wzrostem nalotu pilotów w warunkach rzeczywistych występuje nasilenie objawów choroby symulatorowej, podczas gdy piloci z małym doświadczeniem są bardziej odporni na jej negatywne skutki. Dodatkowo wysoka rozdzielczość wyświetlaczy i coraz wyższa jakość wykonania symulatorów ułatwia wprowadzenie świadomości pilota w błąd, że znajduje się on w rzeczywistym taktku powietrznym. Złudzenie to

wymusza na organizmie pilota reakcje na bodźce odczuwane każdorazowo podczas lotu (przyspieszenie, zmienność położenia względem ziemi itp.). Autorzy tłumaczą to przyzwyczajaniem się systemu percepcyjnego do warunków, których doświadcza on częściej - czyli towarzyszących lotom rzeczywistym. Z przeprowadzonych badań wynika, że piloci wraz z wiekiem oraz doświadczeniem są bardziej odporni na skutki choroby symulatorowej. Zmęczenie odczuwały w największym stopniu osoby w wieku 25–30 lat (73%), piloci wysokomanewrowych statków powietrznych (aż 87%) i osoby, które na symulatorach wylatały mniej niż 250 godz. (72%). We wszystkich wymienionych grupach może być to spowodowane liczbą godzin spędzanych w symulatorach, użytkowanych coraz częściej, jak i zwiększaniem liczby godzin przeznaczonych na trening symulatorowy. Według badania małe doświadczenie pilotów samolotów ultralekkich zarówno w lotach symulowanych, jak i rzeczywistych najprawdopodobniej znacząco negatywnie wpłynęło na psychofizyczny stan badanych. Potwierdziły się również spostrzeżenia z pracy Johnson [7] dotyczące spadku występowania zmęczenia związanego z wyższym wiekiem pilotów. Należy zaznaczyć, że wraz z wiekiem wzrasta doświadczenie i tym można tłumaczyć uodpornienie się na bodźce płynące z wirtualnej rzeczywistości. Aberracja w grupie wiekowej 40–45 lat może wynikać z rodzaju statku powietrznego, ponieważ 5 na 6 pilotów z tej grupy wykonywało loty na symulatorach śmigłowców bojowych. Nasilenie objawów takich jak wymienione wcześniej zmęczenie oczu, trudności z koncentracją oraz ogólnego dyskomfortu prawdopodobnie wynika ze standardowych zmian zachodzących w organizmie wraz z wiekiem – pogorszenia skutecznej koncentracji wzroku przez długi czas i zmniejszonej odporności na niewygodę. Tak jak w literaturze [8,9], badania również wykazały, że wraz z czasem trwania szkolenia symulatorowego wzrasta nasilenie objawów. W przypadku gdy czas trwania treningu był dłuższy niż 60 min, aż 85% badanych, niezależnie od typu statku powietrznego, odczuwało zwiększone zmęczenie, podczas gdy w sesjach trwających poniżej 1 godz. podobną dolegliwość odczuło tylko 33% respondentów. Inne dolegliwości również wyraźnie wzrastały się po 60 min trwania sesji symulatorowej: odsetek pilotów odczuwających trudności ze skupieniem wzroku wzrósł z 20% do 67%, a ogólny dyskomfort pilotów - z 27% do 45%. Istnieje szereg czynników zwiększających prawdopodobieństwo zachorowania na chorobę symulatorową, m.in. przeziębienie, przyjmowane leki, brak snu oraz ogólnie pojmowane zmęczenie. W literaturze [6,10,11,12] opisuje się zasady postępowania w celu ograniczenia występowania choroby symulatorowej, np.:

1. Loty z użyciem symulatorów nie powinny być planowane w tych samych dniach co szkolenie lotnicze na rzeczywistych statkach powietrznych.
2. Z symulatorów mogą korzystać tylko piloci zdrowi, którzy są w dobrej kondycji psychofizycznej.
3. Osoby niemające wcześniej kontaktu z symulatorem lub po długiej przerwie są w grupie ryzyka wystąpienia choroby.
4. Nie powinno się planować ćwiczeń na symulatorze dłuższych niż 2 godz.

5. Należy robić przerwy.

6. Sesja symulatorowa powinna być tym krótsza, im jest intensywniejsza.

7. Każdorazowo przed zresetowaniem lub zastopowaniem misji pilot powinien zamknąć oczy do czasu ponownego uruchomienia zadania.

8. Po zakończeniu ćwiczenia pilot powinien wysiąść z symulatora dopiero po wyłączeniu wizualizacji przestrzennej i oświetlenia kabiny.

Ponadto w każdym przypadku wystąpienia objawów pilot powinien powiadomić o tym instruktora.

3.2. Wpływ poziomu trudności misji bezzałogowego statku powietrznego na autonomiczny układ nerwowy pilota (Publikacja 2)

W niniejszym badaniu głównym celem było wykazanie korelacji między oddziaływaniem symulatora lotu bezzałogowego statku powietrznego a organizmem pilota. Dzięki testom z wykorzystaniem EKG, PZT i pomiarów czasu reakcji udowodniono, że symulator lotu bezpośrednio wywołuje bodźce stresowe, które oddziałują na organizm badanego. Analizując indywidualne wyniki, udowodniono również, że wraz ze wzrostem poziomu trudności wykonywanych misji aktywowana jest część współczulna układu nerwowego.

W trakcie realizacji testów zauważono, że tętno wzrasta wraz ze wzrostem poziomu trudności misji, co odzwierciedlają zmiany parametrów meanRR i meanHR. MeanRR spada z 1004,03 ms przy niskim poziomie trudności trasy do 955,29 ms przy wysokim poziomie trudności. Odpowiada to wzrostowi bpm wraz ze wzrostem poziomu trudności misji z początkowego 59,8 bpm przez 62,8 uderzeń na minutę przy średnim poziomie trudności do 70,2 uderzeń na minutę przy wysokim poziomie trudności misji. Zmienność tętna analizowana na podstawie zmian odchylenia standardowego odstępu RR (SDRR) i średniej kwadratowej kolejnych różnic (rMSSD) sugeruje aktywację układu współczulnego wraz ze wzrostem poziomu trudności misji. Przy niskim poziomie trudności zauważalna jest wyższa średnia wartość parametrów SDRR i rMSSD (SDRR = 71,71 ms, rMSSD = 98,96 ms), co sugeruje dobrą adaptację organizmu w warunkach niskiego stresu. Parametry te maleją wraz ze wzrostem trudności misji i osiągają odpowiednio SDRR = 49,71 ms i rMSSD = 55,87 ms dla średniej oraz SDRR = 46,88 ms i rMSSD = 47,85 ms dla wysokiej trudności. Spadek wartości parametrów może wskazywać na zwiększony stres dla organizmu lub obecność bodźców stresogennych.

Dodatkowym parametrem analizowanym podczas testu, który również wskazuje na aktywację współczulnej części układu nerwowego, jest stosunek LF/HF. W misjach o niskim poziomie trudności zauważalna jest jego niska wartość, co sugeruje dominację działania układu przywspółczulnego. Osiągnięte średnie wartości stosunku LF/HF wynoszące 0,26 są typowe dla warunków relaksacyjnych. Wzrost stosunku LF/HF jest skorelowany ze wzrostem poziomu trudności misji, osiągając maksimum $M = 2,18$. Wraz ze wzrostem obciążenia organizmu ludzkiego spowodowanym zwiększonym poziomem trudności misji przewiduje się wzrost częstości oddechów. Wyniki pokazują, że można zaobserwować przyspieszenie częstości oddechów, ale jest ono nieznaczne. Może to wynikać z faktu, że wszyscy badani byli młodzi i charakteryzowali się wysokim poziomem aktywności fizycznej. Dlatego też praca ich układu oddechowego może być bardziej wydajna i nie podlegać wpływowi przeprowadzanych testów. Testy czasu reakcji przeprowadzono bezpośrednio po wykonaniu przez badanych zadań. Średnie wyniki wykazały znacznie szybszą reakcję, gdy test był wykonywany po misji o wysokim stopniu trudności. Różnica wynosi 15% dla misji łatwych i 10% dla misji o średnim stopniu trudności. Takie wyniki mogą wskazywać na utrzymywanie się pobudzenia współczulnej części układu nerwowego po zakończeniu

testu z wykorzystaniem symulatora. Dzieje się tak, ponieważ organizm jest narażony na stres podczas bardziej złożonych misji i musi utrzymywać wyższy poziom koncentracji.

Jak wskazano w odpowiedniej literaturze [13], skuteczne uczenie się jest utrudnione w warunkach stresu, gdy reakcja na nasze działania jest natychmiastowa, jak ma to miejsce w przypadku pilotowania bezzałogowych statków powietrznych. Ponadto Porcelli i Degado [14] twierdzą, że „chroniczny stres może sprzyjać przejściu do nawykowych reakcji, jednocześnie promując niewrażliwość na nowe sytuacje związane z realizacją celów”. W kontekście szkolenia lotniczego głównym celem jest optymalizacja wydajności poprzez zapewnienie pilotom możliwości przyswajania nowych czynności lotniczych z maksymalną łatwością i biegłością. W związku z tym konieczne jest zwrócenie szczególnej uwagi na poziom stresu pilota podczas procesu szkolenia. Wykazano, że możliwe jest ustalenie poziomu misji, który jest obecnie niski, wysoki lub umiarkowany dla badanego podmiotu. Automatyczny wybór poziomów trudności misji proporcjonalnych do poziomów aktywacji autonomicznego układu nerwowego pilota został zaproponowany jako środek zwiększający skuteczność szkolenia z wykorzystaniem symulatora.

Konieczne są dalsze badania nad reakcją autonomicznego układu nerwowego na bodźce z symulatora lotu bezzałogowego statku powietrznego. Rozszerzenie obecnego badania o bardziej rozbudowaną grupę badawczą, obejmującą osoby w różnym wieku, różnej płci i o różnym poziomie doświadczenia w zakresie lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi, a także zbadanie, jaki wpływ miałyby lotanie w goglach FPV, umożliwiłoby bardziej kompleksową ocenę współczulnej i przywspółczulnej części układu nerwowego. Zebrane dane i potwierdzenie wpływu symulacji lotu bezzałogowych statków powietrznych pozwalają nam przedstawić hipotezę, że możliwe jest wykorzystanie danych z biosensorów jako kontrolerów trudności misji, co spowodowałoby, że pilot podczas każdego ćwiczenia na symulatorze byłby szkolony w warunkach o optymalnym poziomie trudności misji, dostosowanym do jego aktualnych umiejętności i możliwości. Autonomiczny wybór poziomu trudności byłby możliwy dzięki sztucznym sieciom neuronowym nadzorującym procesy szkoleniowe

3.3. Konflikt sensoryczny w sesjach symulacyjnych – pomiar sygnałów fizjologicznych w celu przewidzenia pojawienia się objawów zaburzeń. (Publikacja 3)

Krytyczna analiza wyników różnych badań związanych z chorobą symulatorową i chorobą VR pokazuje, że chociaż istnieją sprawdzone narzędzia i kwestionariusze do oceny i kwantyfikacji tych zjawisk, potrzebne są bardziej kompleksowe badania, aby zrozumieć dokładną naturę i przyczyny choroby symulatorowej. Ponadto należy dokładniej zbadać wpływ choroby symulatorowej na szerokie grono użytkowników, w tym osoby o różnym poziomie doświadczenia w zakresie wirtualnej rzeczywistości. Istniejące kwestionariusze i narzędzia oceny dostarczają cennych informacji na temat objawów choroby symulatorowej. Jednakże, aby zapewnić spójność i wiarygodność różnych badań, potrzebne są standardowe protokoły i procedury przeprowadzania testów podatności. Ponadto uwzględnienie pomiarów fizjologicznych, takich jak badania EKG, EEG i GSR, oprócz subiektywnych kwestionariuszy, może zapewnić bardziej kompleksowe zrozumienie reakcji psychofizycznych na środowiska wirtualne. Takie wielowymiarowe podejście może pomóc w identyfikacji indywidualnych różnic w podatności na chorobę symulatorową i przyczynić się do opracowania ukierunkowanych interwencji i środków zapobiegawczych. Na przykład EKG może dostarczyć informacji na temat zmienności rytmu serca, EEG może wskazywać zmiany w aktywności mózgu, a GSR może mierzyć zmiany przewodnictwa skóry, a wszystko to można skorelować z subiektywnymi doniesieniami o dyskomforcie lub chorobie. Istotne jest również uwzględnienie potencjalnego wpływu złożoności zadania, czasu ekspozycji i charakteru środowiska wirtualnego (np. czy jest to gra, symulacja szkoleniowa czy środowisko terapeutyczne) na wystąpienie i nasilenie choroby symulatorowej. Zrozumienie tych wpływów kontekstowych może pomóc w projektowaniu doświadczeń VR, które minimalizują ryzyko choroby symulatorowej, jednocześnie optymalizując zaangażowanie użytkownika i wydajność. Ponadto należy zbadać długoterminowy wpływ powtarzającej się ekspozycji na środowiska wirtualne na podatność na chorobę symulatorową. Jest to szczególnie istotne w przypadku programów szkoleniowych i rehabilitacyjnych opartych na VR, w których osoby mogą być narażone na działanie środowisk wirtualnych przez dłuższy czas. Badania wydłużone (zwiększony czas ekspozycji na bodźce) mogą dostarczyć cennych informacji na temat mechanizmów adaptacyjnych organizmu ludzkiego, takich jak przyzwyczajanie lub desensytyzacja, oraz potencjalnego wpływu efektów przyzwyczajania w czasie, co może pomóc w opracowaniu bezpieczniejszych i skuteczniejszych doświadczeń VR.

Podsumowując, chociaż dotychczasowe badania rzuciły światło na objawy i ich korelację do choroby symulatorowej, istnieje potrzeba dalszych badań, które zgłębią podstawowe mechanizmy, różnice indywidualne i czynniki kontekstowe związane z tym zjawiskiem. Mogą się one przyczynić do opracowania bezpieczniejszych i skuteczniejszych doświadczeń wirtualnej rzeczywistości dla różnych grup użytkowników. Pomimo dużej liczby artykułów na temat choroby symulatorowej

i choroby VR, istnieje potrzeba intensyfikacji prac nad dokładną naturą tego zjawiska i kwalifikacjami osób odpornych na jego wpływ. Biorąc pod uwagę duże zainteresowanie wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości zarówno w rozrywce, jak i szkoleniach, oraz niski poziom wiedzy użytkowników na temat choroby symulatorowej, wydaje się konieczne przeprowadzenie szkoleń, które będą pełnić zarówno rolę informacyjną, jak i profilaktyczną. Jednak dzięki potencjałowi rozwoju technologii wirtualnej rzeczywistości można oczekiwać, że w przyszłości kwestie te będą lepiej rozumiane i skutecznie rozwiązywane. Na podstawie analizy różnych badań dotyczących konfliktu sensorycznego można zauważyć, że wszystkie objawy psychofizyczne badane w związku z chorobą symulatorową, chorobą VR lub cyberchorobą są bezpośrednio związane z objawami wskazującymi na obecność stresu w najszerszym znaczeniu. Należy rozważyć, czy stres występujący u badanych osób jest związany z obawą przed niepowodzeniem w wykonaniu danego zadania, czy też z samym procesem przeprowadzania testu. Wydaje się, że nieodzownym elementem prawidłowo przeprowadzonych badań związanych z podatnością na chorobę symulatorową jest psychofizyczna weryfikacja badanych osób przed i po testach (badanie EKG, EEG, GSR). Istnieje uzasadniona potrzeba przeprowadzenia dalszych badań nad dokładną naturą tego zjawiska oraz cechami osób odpornych na jego wpływ. Mając na uwadze zainteresowanie wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości w rozrywce i szkoleniach należy zaznaczyć, że użytkownicy potrzebują więcej wiedzy na temat choroby symulatorowej. Konieczne wydaje się przeprowadzenie szkoleń, które będą pełnić zarówno rolę informacyjną, jak i profilaktyczną. Długotrwała ekspozycja na test powoduje zmęczenie i zwiększa poziom stresu badanego, co prowadzi do niejednoznaczności wyników. Dlatego też krótsza, ale bardziej złożona, ustrukturyzowana ekspozycja na bodziec świetlny (ruchomy obraz) może okazać się bardziej dokładna w ocenie podatności na chorobę konfliktu sensorycznego. Krytyczna analiza wyników różnych badań dotyczących choroby symulatorowej i choroby VR pokazuje, że chociaż istnieją sprawdzone narzędzia i kwestionariusze do oceny i kwantyfikacji tych zjawisk, potrzebne są bardziej kompleksowe badania, aby zrozumieć dokładną naturę i przyczyny choroby symulatorowej. Ponadto należy dokładniej zbadać wpływ choroby symulatorowej na szerokie grono użytkowników, w tym osoby o różnym poziomie doświadczenia i podatności. Ponadto opracowanie standardowych protokołów testów podatności na chorobę symulatorową ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia spójności i porównywalności różnych badań. Pomoże to ustalić wiarygodne punkty odniesienia do oceny i porównywania podatności poszczególnych osób na chorobę symulatorową. Ważne jest również rozważenie praktycznych implikacji choroby symulatorowej, zwłaszcza w przypadku wykorzystania VR do szkoleń i rozrywki. Zrozumienie czynników przyczyniających się do choroby symulatorowej i opracowanie skutecznych środków zapobiegawczych ma kluczowe znaczenie dla maksymalnego wykorzystania potencjału technologii VR przy jednoczesnym zminimalizowaniu jej niekorzystnego wpływu na użytkowników. Rozsądne wydaje się przeanalizowanie zastosowania

elektromiografii (EMG) w celu weryfikacji zmęczenia mięśni i na tej podstawie określenia optymalnego czasu trwania testu [15].

4. Wnioski

Wyniki badań przeprowadzonych w przytoczonych źródłach dostarczają informacji na temat subiektywnej podatności na chorobę symulatorową, obiektywnych reakcji psychofizjologicznych oraz potencjału diagnostycznego biosygnatów.

1. Symulator lotu jako źródło stresu i obciążenia organizmu.

Symulacja lotu, mimo swojej kluczowej roli w procesie szkolenia lotniczego, stanowi istotne źródło obciążenia psychofizjologicznego. Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że ekspozycja na środowisko symulatorowe indukuje reakcje stresowe, czego dowodzą pomiary EKG, PZT oraz czasu reakcji. Wraz ze wzrostem poziomu trudności misji odnotowano zwiększoną aktywację współczulnej części autonomicznego układu nerwowego (AUN), przejawiającą się spadkiem meanRR, wzrostem tętna (HR) oraz wzrostem wskaźnika LF/HF.

2. Reakcje fizjologiczne a poziom trudności misji.

Wzrost trudności zadań symulatorowych skutkuje nasileniem reakcji stresowych organizmu. Średnie tętno wzrastało od około 59,8 bpm przy niskiej trudności do ponad 70 bpm przy wysokiej, a wskaźnik LF/HF zwiększał się ponad ośmiokrotnie. Jednocześnie parametry SDRR i rMSSD, świadczące o dobrej adaptacji organizmu, ulegały obniżeniu. Zaobserwowano również skrócenie czasu reakcji po misjach o wysokiej trudności, co wskazuje na utrzymujące się pobudzenie współczulne po zakończeniu zadania.

3. Czynniki ryzyka wystąpienia choroby symulatorowej.

W badaniach zidentyfikowano cztery kluczowe czynniki ryzyka: wiek, rodzaj statku powietrznego, zróżnicowanie misji oraz podatność na chorobę lokomocyjną. Do czynników sprzyjających wystąpieniu objawów należą również: zmęczenie, niedobór snu, przeziębienie i przyjmowanie leków. Z wiekiem obserwuje się ogólny spadek podatności na chorobę symulatorową, jednak częściej występują objawy takie jak zmęczenie oczu czy trudności z koncentracją.

4. Rodzaj statku powietrznego a profil objawów.

Największe nasilenie objawów choroby symulatorowej odnotowano u pilotów samolotów bojowych, ultralekkich oraz śmigłowców, wykonujących zadania o dużej dynamice i liczbie manewrów. Wynika to z nasilonego konfliktu sensorycznego między układem wzrokowym a przedsionkowym. Piloci cywilni, wykonujący spokojniejsze loty, byli mniej narażeni na wystąpienie objawów, co częściowo tłumaczy ich większe doświadczenie i odporność psychofizyczną.

5. Wpływ czasu trwania sesji symulatorowych.

Czas ekspozycji istotnie wpływa na nasilenie objawów choroby symulatorowej. Sesje przekraczające 60 minut powodowały wyraźny wzrost zmęczenia (85% badanych) oraz trudności ze skupieniem wzroku. Zaleca się zatem stosowanie krótszych, lecz

bardziej intensywnej sesji treningowej, trwających poniżej jednej godziny, z uwzględnieniem przerw regeneracyjnych.

6. Świadomość problemu wśród pilotów.

Wyniki badań wskazują na niski poziom wiedzy dotyczącej choroby symulatorowej – aż 77% pilotów (37 z 48 badanych) nie znało tego pojęcia. Niezbędne jest zatem wprowadzenie działań edukacyjnych i profilaktycznych, obejmujących m.in. unikanie sesji w stanie zmęczenia lub choroby, rozdzielanie lotów rzeczywistych i symulatorowych w czasie oraz promowanie higieny pracy w środowisku VR.

7. Subiektywne i obiektywne metody oceny.

Ocena nasilenia objawów choroby symulatorowej opiera się głównie na subiektywnych kwestionariuszach (np. SSQ). Coraz większe znaczenie przypisuje się jednak obiektywnym pomiarom biosygnali, takim jak:

- EKG/HRV – oceniające aktywację AUN,
- EEG – identyfikujące konflikty sensoryczne w korze mózgowej,
- EGG – odzwierciedlające aktywność żołądkową związaną z mdłościami,
- GSR/SC – monitorujące ogólne pobudzenie emocjonalne.

Integracja metod subiektywnych i obiektywnych umożliwia pełniejszą i bardziej wiarygodną ocenę reakcji psychofizjologicznych.

8. Potrzeba standaryzacji metod diagnostycznych.

Obserwowane rozbieżności w wynikach badań wskazują na konieczność opracowania ujednoliconych protokołów diagnostycznych, łączących pomiary fizjologiczne (EKG, EEG, GSR, EGG) z oceną subiektywną (SSQ, MSAQ). Taka standaryzacja pozwoli na porównywalność wyników i pogłębione zrozumienie mechanizmów choroby symulatorowej.

9. Potencjał predykcyjny biosygnali i kierunki dalszych badań.

Potwierdzony wpływ symulacji lotu na parametry fizjologiczne pilota otwiera możliwość wykorzystania biosygnali do automatycznego sterowania poziomem trudności misji. Systemy oparte na analizie HRV czy EEG mogłyby w czasie rzeczywistym dostosowywać intensywność zadań do aktualnego poziomu stresu i koncentracji pilota. W przyszłych badaniach wskazane jest poszerzenie grupy badawczej oraz uwzględnienie wpływu nowoczesnych technologii wizualizacji, takich jak gogle FPV.

5. Spis piśmiennictwa

1. Kluch W.: Badania fizjologiczne przebiegu restytucji narządu przedsionkowego u osób poddawanych przyspieszeniom w symulatorze GYRO IPT. *Pol. Przegl. Med. Lotn.* 2003;4:399–415
2. Duh H.B., Parker D.E., Philips J.O., Furness T.A.: “Conflicting” motion cues to the visual and vestibular self-motion systems around 0.06 Hz evoke simulator sickness. *Hum.Factors* 2004;46(1):142–153, <https://doi.org/10.1518/hfes.46.1.142.30384>
3. Stanney K.M., Kennedy R.S., Drexler J.M.: Cybersickness is not simulator sickness. *Proc. Hum. Ergon. Soc. Annu. Meet.* 1997;41(2):1138–1142, <https://doi.org/10.1177/107118139704100292>
4. Wojciechowski P, Wojtowicz K. Simulator sickness and cybersickness as significant indicators in a primary selection of candidates for FPV drone piloting. In: 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace); 2022 Jun 27–29; Pisa, Italy. IEEE; 2022. p. 130-3. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace54187.022.9856141>.
5. P. Wojciechowski, K. Wojtowicz, J. Błaszczuk, “Sensory conflict in simulator sessions – measuring biosignals to predict the onset of disorderly symptoms: a brief literature review.” *Int J Occup Med Environ Health.* 2024;37(5):482-494. doi:10.13075/ijomeh.1896.02410.
6. Virre E., Clark J.B.: *Airsickness and Space Sickness.* W: Kennedy C.H., Kay G.G. [red.]. *Aeromedical Psychology.* ASHGATE, Surrey England 2013, ss. 195–213
7. Johnson D.M.: *Introduction to and Review of Simulator Sickness Research.* Technical Report 1832. United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, Arlington 2005
8. Kennedy R., Stanney K.M., Dunlap W.: Duration and exposure to virtual environments: sickness curves during and across sessions. *Presence* 2000;9(5):463–472
9. Lackner J.R., Larry R.S.: Motion sickness. W: Squire R. [red.]. *Encyclopedia of Neuroscience.* Academic Press, Oxford 2009, ss. 989–993
10. Bruck S., Watters P.A.: The factor structure of cybersickness. *Displays* 2011;32(4):153–158, <https://doi.org/10.1016/j.displa.2011.07.002>
11. ASHGATE, Surrey England 2013, ss. 195–213 Kolasinski E.M.: *Simulator Sickness in Virtual Environments.* Technical Report 1027. United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, Alexandria 1995
12. Kennedy R.S., Lilienthal M.G., Berbaum K.S., Baltzley D.R., McCauley M.E.: *Simulatorsickness in U.S. Navy flight simulators.* *Aviat. Space Environ. Med.* 1989;60(1):10–16

13. Paul M, Bellebaum C, Ghio M, Suchan B, Wolf OT. Stress effects on learning and feedback-related neural activity depend on feedback delay. *Psychophysiology*. 2020; 57:e13471. <https://doi.org/10.1111/psyp.13471>.
14. Porcelli AJ, Delgado MR. Stress and Decision Making: Effects on Valuation, Learning, and Risk-taking. *Curr Opin Behav Sci*. 2017 Apr;14:33-39. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.11.015>.
15. Daniel N, Malachowski J. Wavelet analysis of the EMG signal to assess muscle fatigue in the lower extremities during symmetric movement on a rowing ergometer. *Acta Bioeng Biomech*. 2023;25:2. <https://dx.doi.org/10.37190/ABB-02282-2023-04>.

Aneks

1. Kwestionariusz ankiety.
2. Zgoda z Komisji Bioetyki na badania.
3. Publikacja 1.
4. Oświadczenia o współautorstwie.
5. Publikacja 2.
6. Oświadczenia o współautorstwie.
7. Publikacja 3.
8. Oświadczenia o współautorstwie.

1. Kwestionariusz ankiety.

ANKIETA

Szanowni Państwo!

Chciałbym prosić o udział w ankiecie dotyczącej wpływu wirtualnej rzeczywistości na człowieka. Dane, które z niej uzyskam, pozwolą mi w napisaniu pracy dotyczącej odporności na chorobę symulatorową. Ankieta jest anonimowa. Wypełnienie ankiety polega na wybraniu i zaznaczeniu (kółkiem) poprawnych odpowiedzi lub udzieleniu krótkich odpowiedzi. Za wypełnienie ankiety serdecznie dziękuję.

Płeć:

kobieta mężczyzna

Wiek [lat]:

...-25 25-30 30-35 35-40 40-45 45-...

Nalot (w godzinach):

w powietrzu: na symulatorze:

Częstość ćwiczeń na symulatorze:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7/tydz. 5, 7, 10, 15, 20/mc

Średnia długość trwania jednej sesji symulatorowej [min]:

10-20 20-40 40-60 60-...

Czy słyszał/a Pan/Pani o chorobie symulatorowej?

tak nie

Czy zna Pan/Pani objawy choroby symulatorowej?

tak nie

Jeśli tak, to jakie?

Czy kiedykolwiek, podczas sesji symulatorowej, odczuł/a Pan/Pani:

zmęczenie	w ogóle	rzadko	czasem	często
ból głowy	w ogóle	rzadko	czasem	często
zmęczenie oczu	w ogóle	rzadko	czasem	często
trudności skupienia	w ogóle	rzadko	czasem	często
nadmierne wydzielanie śliny	w ogóle	rzadko	czasem	często
pocenie się	w ogóle	rzadko	czasem	często
mdłości	w ogóle	rzadko	czasem	często
trudności z koncentracją	w ogóle	rzadko	czasem	często
zamazany obraz	w ogóle	rzadko	czasem	często
zawroty głowy	w ogóle	rzadko	czasem	często
utrata orientacji	w ogóle	rzadko	czasem	często
„sensacje” żołądkowe	w ogóle	rzadko	czasem	często
ogólny dyskomfort	w ogóle	rzadko	czasem	często

Czy objawy te (jeśli wystąpiły) mogły być spowodowane:

chorobą (przeziębienie, grypa)	tak	nie
alergią	tak	nie
zmęčeniem	tak	nie
przyjmowaniem leków	tak	nie
kacem	tak	nie

Na podstawie / Based on: Kennedy R.S. i wsp. / et al.: Simulator Sickness Questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness [7].

2. Zgoda z Komisji Bioetycznej na badania.



WOJSKOWA IZBA LEKARSKA

KOMISJA BIOETYCZNA

ul. Jana Pawła Woronicza 15, 02-625 Warszawa

NIP 113-19-36-487, REGON 006231150

tel. 22 621 04 93, fax. 22 621 12 11 www.wojskowa-il.org.pl, e-mail:wojsko@hipokrates.org

Konto: PKO BP S.A. IX O/Warszawa Nr 10 1020 1097 0000 7602 0005 0054

94 KB

Uchwała Nr 20.../23

Komisji Bioetycznej przy Wojskowej Izbie Lekarskiej w Warszawie

z dnia 14 lipca 2023 r.

w sprawie wydania opinii o projekcie eksperymentu medycznego

Na podstawie art. 29 ust. 1 zdanie 1 ustawy z dnia 5 grudnia 1996 r. o zawodzie lekarza i lekarza dentysty (t.j. Dz. U. z 2021 r., poz. 790 ze zm):

§ 1

Komisja Bioetyczna przy Wojskowej Izbie Lekarskiej w Warszawie w składzie:

- 1) przewodniczący – płk rez. prof. dr hab. n. med. Grzegorz Kamiński
- 2) z-ca Przewodniczącego – płk w st. spocz. dr hab. n. med. dr n. farm. Wiesław Piechota
- 3) mgr Żaneta Andrzejczak
- 4) mgr Monika Dziuk
- 5) płk w st. spocz. prof. n. med. Krzysztof Klukowski
- 6) gen. bryg. w st. spocz. prof. dr hab. n. med. Marek Maruszyński
- 7) płk prof. dr hab. n. med. Witold Owczarek
- 8) płk w st. spocz. dr n. med. Zbigniew Zaręba
- 9) płk rez. dr n. med. Szczepan Barnaś

- na posiedzeniu w dniu 14.07.2023 r. **wydaje pozytywną opinię o projekcie eksperymentu medycznego** pod tytułem „Choroba symulatorowa i choroba cybernetyczna jako wskaźnik we wstępnej selekcji kandydatów na pilotów dronów”, kierowane będzie przez prof. dr hab. med. Jana Błaszczyka z Wydziału Nauk o Zdrowiu Akademii Kaliskiej im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego (specjalność fizjologii stosowanej) przy współpracy z kpt. mgr inż. Przemysławem Wojciechowskim asystentem dydaktycznym w Zakładzie Awioniki, Wydziału Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej oraz ppłk. dr inż. Konrada Wojtowicza Prodziekana Wydziału Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa WAT, które będzie prowadzone w Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46, pod warunkiem dostarczenia ubezpieczenia.

§ 2


Komisja Bioetyczna przypomina, że obowiązkiem głównego badacza jest :

1. zgłoszenia wszelkich zmian i odchyień w protokole eksperymentu medycznego,
2. zgłoszenia wszelkich nowych informacji wiążących się z niekorzystnym wpływem na bezpieczeństwo osób biorących udział w eksperymencie oraz na jego przebieg,
3. zgłoszenia wszelkich ciężkich lub nieoczekiwanych niepożądanych działań leków (ADR) a także ciężkich zdarzeń niepożądanych (SAE)
4. informowania o decyzjach innych komisji bioetycznych,
5. sporządzania rocznych raportów z przebiegu eksperymentu (nie później niż do końca grudnia każdego roku)
6. informowania o zakończeniu eksperymentu i jego wynikach, w tym wymóg dostarczenia kopii ostatecznej wersji raportu z eksperymentu po jego zakończeniu.

Wszelka korespondencja musi być przekazywana na piśmie listem poleconym bądź za potwierdzeniem odbioru.

Tekst uchwały został sporządzony w 2 jednobrzmiących egz. po jednym dla wnioskodawcy i Komisji Bioetycznej.

Skład i działanie Komisji Bioetycznej jest zgodne z Wskazówkami i Zaleceniami dla Europejskich Komisji Etycznych opracowanymi przez EFGCP, Zasadami Prawidłowego Prowadzenia Badań Klinicznych (GCP) oraz wymogami lokalnymi.

PRZEWODNICZĄCY
Komisji Bioetycznej
przy Wojskowej Izbie Lekarskiej

prof. dr hab. n. med. Grzegorz Kamiński
Podpis Przewodniczącego

Pouczenie:

Zgodnie z art. 29 ust. ustawy z dnia 5 grudnia 1996 r. o zawodach lekarza i lekarza dentysty (t.j. Dz. U. z 2021 r., poz. 790 ze zm.) odwołanie od uchwały komisji bioetycznej wyrażającej opinię może wnieść:

- 1) wnioskodawca;
- 2) kierownik podmiotu, w którym eksperyment medyczny ma być przeprowadzony;
- 3) komisja bioetyczna właściwa dla ośrodka, który ma uczestniczyć w wieloośrodkowym eksperymencie medycznym.

Odwołanie wnosi się za pośrednictwem komisji bioetycznej, która podjęła uchwałę, do Odwoławczej Komisji Bioetycznej ul. Miodowa 15, 00-952 Warszawa w terminie 14 dni od dnia otrzymania uchwały wyrażającej opinię.

LISTA OBECNOŚCI CZŁONKÓW
KOMISJI BIOETYCZNEJ PRZY WOJSKOWEJ IZBIE LEKARSKIEJ
biorących udział w głosowaniu
Uchwała 20/23
w dniu 14.07.2023 r.

lp.	imię i nazwisko	zawód/specjalizacja	podpis
1	Grzegorz Kamiński PRZEWODNICZĄCY	płk rez. prof. dr hab. n. med. choroby wewnętrzne, kardiologia, endokrynologia, medycyna nuklearna	zdalnie
2	Wiesław Piechota ZASTĘPCA PRZEWODNICZĄCEGO	płk w st. spocz. dr hab. n. med. dr n. farm. farmacja	zdalnie
3	Żaneta Andrzejczak	mgr pielęgniarstwa	zdalnie
4	Monika Dziuk	mgr prawnik	zdalnie
5	Dariusz Iwański	ks. dr hab. ksiądz	nieobecny
6	Bogdan Brodacki	ppłk dr n. med. neurologia, organizacja ochrony zdrowia wojsk	nieobecny
7	Krzysztof Klukowski	płk w st. spocz. prof. dr hab. n. med. med. sportowa i rehabilitacja medyczna	zdalnie
8	Karol Makowski	płk dr hab. n. med. kardiologia	nieobecny
9	Marek Maruszyński	gen. bryg. w st. spocz. prof. dr hab. n. med. chirurgia ogólna, chirurgia naczyniowa, chirurgia onkologiczna	zdalnie
10	Witold Owczarek	płk prof. dr hab. n. med. dermatologia i wenerologia	zdalnie
11	Zbigniew Zaręba	płk w st. spocz. dr n. med. chirurgia ogólna, chirurgia onkologiczna	zdalnie
12	Norbert Gabarkiewicz	mgr prawnik	nieobecny
13	Szczepan Barnaś	płk rez. dr n. med. otolaryngologia	zdalnie

Obecność członków Komisji potwierdzona podpisami stanowiącymi załącznik do protokołu w dniu 14.07.2023 r.

Zatwierdził:

PRZEWODNICZĄCY
Grzegorz Kamiński
 Komisji Bioetycznej
 przy Wojskowej Izbie Lekarskiej

prof. dr hab. n. med. Grzegorz Kamiński

**Polisa nr 436000391648**Okres ubezpieczenia: od **04.04.2025 00:00** do **31.12.2025 23:59****Umowa generalna nr SZ50/002564/24/A**Ubezpieczyciel: **Sopockie Towarzystwo Ubezpieczeń ERGO Hestia SA****Ubezpieczający:****OPEN GROUP SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ**

NIP: 956-23-77-157

UL. Szosa Chełmińska 177-181, 87-100 Toruń

Ubezpieczony:**WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA IM. JAROSŁAWA
DĄBROWSKIEGO**

NIP: 527-02-06-300

UL. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 WARSZAWA

Warunki ubezpieczenia:**Ubezpieczenie OC z tytułu wykonywania zawodu****M31-23**

Dodatkowo ubezpieczeni:	Przemysław Wojciechowski
Przedmiot ubezpieczenia:	odpowiedzialność cywilna w związku z przeprowadzeniem eksperymentu medycznego: "Choroba symulatorowa i choroba cybernetyczna jako wskaźnik we wstępnej selekcji kandydatów na pilotów dronów"
Czynności zawodowe przyjęte do ubezpieczenia:	Przeprowadzenie eksperymentu badawczego
Podstawa zawarcia umowy:	Rozporządzenie Ministra Finansów, Funduszy i Polityki Regionalnej z dnia 23 grudnia 2020 r. w sprawie obowiązkowego ubezpieczenia odpowiedzialności cywilnej podmiotu przeprowadzającego eksperyment medyczny
Zakres ubezpieczenia:	zgodnie z Rozporządzenie Ministra Finansów, Funduszy i Polityki Regionalnej z dnia 23 grudnia 2020 r. w sprawie obowiązkowego ubezpieczenia odpowiedzialności cywilnej podmiotu przeprowadzającego eksperyment medyczny
Suma gwarancyjna:	100 000,00 EUR
Franszyza:	zgodnie z rozporządzeniem
Składka:	1 100,00 PLN

Postanowienia dodatkowe:

Obowiązkowe ubezpieczenie OC podmiotu przeprowadzającego eksperyment medyczny zgodnie z rozporządzeniem Ministra Finansów, Funduszy i Polityki Regionalnej z dnia 23 grudnia 2020 r. w sprawie obowiązkowego ubezpieczenia odpowiedzialności cywilnej przeprowadzającego eksperyment medyczny (Dz. U. 2020 poz. 2412)

Klauzula objęcia ochroną eksperymentów

Strony uzgodniły, iż ochrona ubezpieczeniowa dla prowadzonego eksperymentu rozpoczyna się do dnia wydania zgody przez Komisję Bioetyczną lub od momentu poinformowania o tym Ubezpieczyciela (w zależności od ustaleń stron w ramach danej umowy ww. ubezpieczenia OC, potwierdzonej stosowną polisą lub certyfikatem). W ciągu 30 dni od dnia wydania zgody eksperyment zostanie zgłoszony do Ubezpieczyciela

Klauzula ubezpieczenie Zespołu Badawczego i Komisji Bioetycznej

Strony uzgodniły, że rozszerzona zostaje ochrona ubezpieczeniowa o odpowiedzialność cywilną:

- a) Zespołu badawczego obejmującego lekarzy, personel medyczny, konsultantów medycznych oraz inne osoby świadczące usługi medyczne, którzy wykonują pracę na rzecz Ubezpieczonego w związku z ubezpieczonym eksperymentem,
- b) Komisji bioetycznej i jej członków, którzy zaopiniowali ubezpieczony eksperyment

Klauzula braku rozpoczęcia eksperymentu

Strony uzgodniły, iż w przypadku opłacenia składki za eksperyment medyczny, który nie zostanie rozpoczęty Ubezpieczający poinformuje Ubezpieczyciela o tym fakcie, co automatycznie będzie skutkowało zwrotem uiszczanej składki.

Klauzula utrzymania składki

Strony uzgodniły, iż w przypadku gdy czas trwania ubezpieczonego eksperymentu przekracza 12 miesięcy składka za polisę na kolejne 12 miesięcy (i następne) będzie tożsama z bazowym okresem ubezpieczenia (12 miesięcy).

Potwierdzam rezygnację z prawa do regresu, o którym mowa w art. 11 ust. 3 Ustawy o ubezpieczeniach obowiązkowych, UFG i PBUK.

Liczba uczestników: 100

Postanowienia dodatkowe:

Umowę ubezpieczenia zawarto na podstawie Ogólnych Warunków Ubezpieczenia określonych powyżej, z zastosowaniem klauzul dodatkowych określonych powyżej – stanowiących integralną część umowy. Umowę przygotowano na podstawie oferty A/SZ50/0898368/1.

Spory wynikające z Umowy ubezpieczenia pomiędzy Ubezpieczającym, Ubezpieczonym lub innym uprawnionym z umowy ubezpieczenia, będącym osobą fizyczną, a Ubezpieczycielem mogą być rozpoznane w drodze pozasądowego postępowania przed Rzecznikiem Finansowym - Al. Jerozolimskie 87, 02-001 Warszawa, www.rf.gov.pl. który jest podmiotem uprawnionym do prowadzenia pozasądowych postępowań w świetle przepisów Ustawy z dnia 5 sierpnia 2015 r. o rozpatrywaniu reklamacji przez podmioty rynku finansowego i o Rzeczniku Finansowym.

Każda ze Stron niniejszej Umowy Ubezpieczenia będzie przetwarzać przekazane jej w celu zawarcia i wykonywania tej umowy dane osobowe dotyczące osób upoważnionych do reprezentacji, wspólników, współpracowników, pracowników, osób, którymi Strony posługują się przy realizacji niniejszej Umowy Ubezpieczenia i pełnomocników drugiej Strony.

Udostępniane dane obejmują: imię i nazwisko, stanowisko służbowe, służbowy adres e-mail i służbowy numer telefonu, o ile zostaną przekazane drugiej Stronie.

Każda ze Stron zobowiązuje się przetwarzać dane osobowe udostępnione przez drugą Stronę w sposób zgodny z obowiązującymi przepisami o ochronie danych osobowych, w szczególności z przepisami ogólnego rozporządzenia o ochronie danych (RODO).

Każda ze stron niniejszej Umowy Ubezpieczenia otrzymała klauzulę informacyjną, załączoną poniżej i zobowiązuje się do realizacji obowiązku informacyjnego w terminach wskazanych w przepisach RODO wobec wszystkich osób, o których mowa powyżej poprzez poinformowanie tych osób o treści klauzuli.

Składka i sposób płatności:

Składka łączna:	1 100,00 PLN (słownie: tysiąc sto złotych 0/100)	
Składka płatna na rachunek bankowy:	16 1240 6960 6013 4360 0039 1648	
Warunki płatności składki:	płatna jednorazowo	
Termin płatności i kwota raty:	07.05.2025	1 100,00 PLN

**Oświadczenie Ubezpieczającego:**

Oświadczam, że zostało mi okazane i zapoznałem się z treścią pełnomocnictwa do zawarcia umowy ubezpieczenia w imieniu Sopockiego Towarzystwa Ubezpieczeń Ergo Hestia SA oraz potwierdzam, że przed zawarciem umowy otrzymałem tekst Ogólnych Warunków Ubezpieczenia wraz z klauzulami dodatkowymi, na podstawie których umowę zawarto oraz zapoznałem się z nimi i zaakceptowałem ich treść.

ZASADY SKŁADANIA I ROZPATRYWANIA REKLAMACJI W ERGO HESTII

(1) Ubezpieczający, ubezpieczony, uposażony lub uprawniony z umowy ubezpieczenia, poszukujący ochrony ubezpieczeniowej lub zleceniodawca gwarancji ubezpieczeniowej (Klient) mogą wnieść reklamację dotyczące usług świadczonych przez ERGO Hestię lub agenta ubezpieczeniowego, to jest: (a) dotyczące działalności ubezpieczeniowej świadczonej przez ERGO Hestię oraz dotyczące czynności agencyjnych wykonywanych przez Agentą ERGO Hestii, w tym w zakresie niezwiązanym z udzielaną ochroną ubezpieczeniową – ubezpieczycielowi w następujący sposób; poprzez formularz na stronie: www.ergohestia.pl; telefonicznie, pod numerem: 801107107 lub 585555555; pisemnie, na adres siedziby Sopockiego Towarzystwa Ubezpieczeń ERGO Hestia SA, ul. Hestii 1, 81-731 Sopot; ustnie lub pisemnie podczas wizyty w jednostce Sopockiego Towarzystwa Ubezpieczeń ERGO Hestia SA. (b) dotyczące czynności agencyjnych wykonywanych przez Agentą w zakresie niezwiązanym z udzielaną ochroną ubezpieczeniową, o ile Agent wykonuje czynności agencyjne na rzecz więcej, niż jednego zakładu ubezpieczeń w zakresie tego samego działu zgodnie z załącznikiem do ustawy z dnia 11 września 2015 r. o działalności ubezpieczeniowej i reasekuracyjnej (ubezpieczenia na życie lub ubezpieczenia majątkowe). (2) Reklamacje wskazane w ust. 1a. rozpatrywane są przez jednostkę organizacyjną powołaną w tym celu przez Zarząd ERGO Hestii. (3) Reklamacje wskazane w ust. 1b. rozpatrywane są przez Agentą, którego działalności reklamacja dotyczy i powinny być wniesione bezpośrednio temu Agentowi. W przypadku wpływu takiej reklamacji do ERGO Hestii, ERGO Hestia przekaze reklamację niezwłocznie Agentowi, informując o tym jednocześnie Klienta występującego z reklamacją. (4) Odpowiedź na reklamację zostanie wysłana w terminie 30 dni od dnia jej otrzymania na piśmie lub za pomocą innego trwałego nośnika informacji albo pocztą elektroniczną - na wniosek osoby zgłaszającej reklamację. (5) W szczególnie skomplikowanych przypadkach, uniemożliwiających rozpatrzenie reklamacji i udzielenie odpowiedzi w terminie określonym powyżej, odpowiedź zostanie wysłana w terminie 60 dni od dnia jej otrzymania. O konieczności przedłużenia terminu do udzielenia odpowiedzi na reklamację Klient zostanie poinformowany w podanym w punkcie 4 powyżej 30-dniowym terminie. (6) W niestandardowych sprawach Klient może zwrócić się do Rzecznika Klienta ERGO Hestii poprzez formularz na stronie: www.ergohestia.pl. (7) Klient może wystąpić z wnioskiem o rozpatrzenie sprawy do Rzecznika Finansowego www.rf.gov.pl

Ubezpieczający

Ubezpieczyciel

Przedstawicielstwo Korporacyjne Szczecin

Umowa przygotowana przez: Bartosz Dobiszewski, nr UWR 001259

Numer Pośrednika: 000065

Polisę wystawiono w Szczecinie, dnia 08.04.2025

**Oświadczenie Administratora Danych Osobowych**

1. Administratorem danych osobowych jest Sopotkie Towarzystwo Ubezpieczeń ERGO Hestia S.A. (dalej: ERGO Hestia). Osoba fizyczna, której dane dotyczą, może skontaktować się z administratorem danych osobowych:
 - 1) pisemnie, na adres **ul. Hestii 1, 81-731 Sopot**;
 - 2) telefonicznie, pod numerem: **801 107 107** lub **(58) 555 55 55**.
2. Administrator danych osobowych wyznaczył Inspektora Ochrony Danych, z którym można się kontaktować we wszystkich sprawach dotyczących przetwarzania danych osobowych oraz korzystania z praw związanych z przetwarzaniem danych. Osoba, której dane dotyczą, może skontaktować się z Inspektorem Ochrony Danych:
 - 1) pisemnie, na adres **ul. Hestii 1, 81-731 Sopot**;
 - 2) za pośrednictwem adresu mailowego: **iod@ergohestia.pl**;
 - 3) poprzez formularz kontaktowy w sekcji Ochrona Danych Osobowych na stronie **www.ergohestia.pl**.
3. Administrator danych osobowych przetwarza dane osobowe w celach:
 - 1) kontaktowych w związku z zawarciem i wykonaniem umowy pomiędzy administratorem a podmiotem, w imieniu, którego działa Pani/Pan jako osoba upoważniona do reprezentacji, wspólnik, współpracownik, pracownik, pełnomocnik lub osoba, którą strona umowy posługuje się przy realizacji umowy;
 - 2) archiwizacyjnych;
4. Podstawy prawne przetwarzania danych osobowych:
 - 1) prawnie uzasadniony interes administratora danych;
 - 2) wypełnienie obowiązków prawnych administratora danych;
5. Dane osobowe zostały pozyskane od podmiotu, z którym administrator zawarł umowę, którego Pani/Pan reprezentuje w następującym zakresie: imię, nazwisko, służbowy numer telefonu, służbowy adres e-mail.
6. Dane osobowe mogą być przekazywane podmiotom przetwarzającym dane osobowe na zlecenie ERGO Hestii m.in. dostawcom usług IT, podmiotom świadczącym usługi archiwizacyjne, kancelariom prawnym, prowadzącym działalność pocztową lub kurierską, audytorom.
7. Osoby, których dane osobowe przetwarzane są przez ERGO Hestię, mają w związku z przetwarzaniem następujące prawa:
 - 1) prawo dostępu do swoich danych osobowych;
 - 2) prawo żądania sprostowania, usunięcia lub ograniczenia przetwarzania ich danych osobowych;
 - 3) prawo wniesienia sprzeciwu wobec przetwarzania danych osobowych – w takim zakresie, w jakim są one przetwarzane;
 - 4) prawo wniesienia skargi do organu nadzorczego zajmującego się ochroną danych osobowych.
8. W celu skorzystania z praw określonych w ust. 7 należy skontaktować się z administratorem danych lub z Inspektorem Ochrony Danych.
9. Dane osobowe będą przechowywane do momentu przedawnienia roszczeń z tytułu umowy zawartej z podmiotem, którego Pani/Pan reprezentuje lub do momentu wygaśnięcia obowiązku przechowywania danych wynikającego z przepisów prawa

3. Publikacja 1.

CHOROBA SYMULATOROWA W SZKOLENIU PILOTÓW WOJSKOWYCH I CYWILNYCH RÓŻNYCH TYPÓW STATKÓW POWIETRZNYCH

SIMULATOR SICKNESS IN THE AIRCRAFT TRAINING OF MILITARY
AND CIVIL PILOTS OF VARIOUS TYPES OF AIRCRAFT

Przemysław Wojciechowski¹, Jan Błaszczuk²

¹ 31 Baza Lotnictwa Taktycznego / 31st Tactical Air Base, Poznań, Poland

² Uniwersytet Medyczny w Łodzi / Medical University of Lodz, Łódź, Poland
Katedra Nauk Podstawowych, Zakład Fizjologii Człowieka / Chair of Basic Science, Department of Human Physiology

STRESZCZENIE

Wstęp: Wraz z większą popularnością i dostępnością szkoleń symulatorowych wykorzystywanych do treningu pilotów zaobserwowano pojawianie się licznych efektów ubocznych tej technologii. Objawy choroby symulatorowej są zbliżone do dolegliwości związanych z chorobą lokomocyjną – m.in. zawroty głowy, wymioty, a także dezorientacja przestrzenna oraz ograniczenie zdolności koncentracji. Zależą one jednak od indywidualnych predyspozycji użytkowników symulatorów. **Materiał i metody:** Celem pracy była ocena prawdopodobieństwa wystąpienia choroby symulatorowej podczas ćwiczeń w wirtualnej rzeczywistości oraz jej wpływu na efektywność szkolenia. Próba badawcza liczyła 32 wojskowych i 16 cywilnych pilotów różnych typów statków powietrznych. W celu subiektywnej oceny stanu psychofizycznego pilotów wykorzystano ankietę wzorowaną na *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ). **Wyniki:** Wyodrębniono 4 główne czynniki wpływające na możliwość wystąpienia choroby symulatorowej: wiek badanej osoby, zróżnicowanie misji, rodzaj statku powietrznego i podatność na chorobę lokomocyjną. **Wnioski:** W związku z indywidualnymi predyspozycjami badanych pilotów określenie ryzyka wystąpienia choroby symulatorowej wydaje się trudne. Istnieją jednak czynniki, które zwiększają prawdopodobieństwo zachorowania – przeziębienie, spożywane leki, niedobór snu i ogólne zmęczenie. Niepokojący jest brak wiedzy na temat choroby symulatorowej wśród pilotów. Warto zatem zastanowić się nad możliwościami edukacji tej grupy zawodowej w tym zakresie, przede wszystkim w celu uzyskiwania lepszych wyników w sesjach symulatorowych, w sytuacji łatwego dostępu do wirtualnej rzeczywistości. Med. Pr. 2019;70(3):317–325

Słowa kluczowe: choroba symulatorowa, rzeczywistość wirtualna, pilot, badanie ankietowe, symulatory, kwestionariusz SSQ

ABSTRACT

Background: With the rise in popularity and availability of simulators for the aircraft training of pilots, numerous side effects of that technology have been noted among their users. The symptoms of simulator sickness are similar to the symptoms of motion sickness. Dizziness, nausea, as well as spatial disorientation and a limited capacity for concentration may be observed. However, those symptoms depend on individual user's predispositions. **Material and Methods:** The aim of the research was to assess the probability of occurrence of simulator sickness during exercises in virtual reality, and its impact on the effectiveness of training. Thirty two military and 16 civilian pilots of various types of aircraft took part in the research. For the subjective assessment of the psychophysical condition of the pilots, a questionnaire based on *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) was used. **Results:** Four main factors that are associated with the prevalence of simulator sickness have been identified, i.e., age, a variety of missions, a type of aircraft and susceptibility to motion sickness. **Conclusions:** Due to the individual characteristics of each person, determining the risk of occurrence of simulator sickness seems to be difficult. However, there are some factors that increase the probability of getting sick, including cold, medications, lack of sleep and general fatigue. The lack of knowledge about simulator sickness among aircraft pilots appears rather alarming. When access to virtual reality is so wide, the possible ways of expanding the knowledge in this area should be considered, especially in order to obtain better results in simulator sessions. Med Pr. 2019;70(3):317–25

Key words: simulator sickness, virtual reality, pilot, questionnaire survey, simulators, *Simulator Sickness Questionnaire*

Autor do korespondencji / Corresponding author: Przemysław Wojciechowski, 31 Baza Lotnictwa Taktycznego,
ul. Silniki 1, 61-325 Poznań, e-mail: przemyslaw.a.wojciechowski@gmail.com
Nadesłano: 26 marca 2018, zatwierdzono: 6 grudnia 2018

WSTĘP

W przeciągu ostatnich 20 lat można zauważyć znaczący wzrost zastosowania symulatorów w różnych dziedzinach życia. Obecnie oprócz symulatorów do szkolenia pilotów statków powietrznych, kierowców pojazdów transportowych (ciężarówek, wózków widłowych itd.) czy nauki żeglugi stosuje się również symulatory rozrywkowe (*VR headsets*) dostępne dla szerokiego grona odbiorców. Wraz ze wzrostem popularności i dostępności symulatorów, a także ze zwiększeniem ich wykorzystania, zauważono występowanie skutków ubocznych tej technologii. Informacje na ten temat pochodzą głównie z instytutów i ośrodków szkoleniowych wyposażonych w pełne symulatory lotu (*full flight simulator – FFS*), czyli modele najbardziej zaawansowane technicznie. Mają one w pełni funkcjonalną i pełnowymiarową replikę kokpitu oraz system wizualizacji zapewniający płynny widok o wysokiej rozdzielczości, obrazujący sytuację przestrzenną poza kabiną. Należy zaznaczyć, że choroba symulatorowa występuje u pilotów w symulatorach zarówno opartych na systemie projekcyjnym (*spatially immersive display – SID*), jak i wykorzystujących infohelm (*head-mounted display – HMD*) [1,2].

Choroba symulatorowa objawia się dolegliwościami takimi jak nudności, zawroty głowy, senność, oszołomienie, zmęczenie, bladeść skóry, zimne poty, wymioty, ból głowy, trudności ze skupieniem czy zmęczenie oczu. W badaniach [3] odnotowano także występowanie halucynacji, ale jest to sytuacja bardzo rzadka. Dolegliwości w chorobie symulatorowej pokrywają się z objawami choroby lokomocyjnej czy morskiej [4]. Należy jednak zaznaczyć, że główne symptomy chorób związanych z ruchem mają zasadniczo podłoże gastryczne (wymioty, nudności, odbijanie się), podczas gdy w chorobach powodowanych kontaktem z wirtualną rzeczywistością występują dolegliwości ze strony narządu wzroku (trudności skupienia wzroku, ból głowy, rozmazany obraz) [1,2,5].

W literaturze można znaleźć dane dotyczące czynników sprzyjających występowaniu choroby symulatorowej. Płeć, podatność na chorobę lokomocyjną, różne profile misji wykonywanych podczas ćwiczeń oraz wiek mogą determinować odczuwanie dolegliwości. Ponadto czynnikami zwiększającymi podatność na chorobę są: deficyty snu, grypa, choroby górnych dróg oddechowych, zapalenie uszu, niektóre leki, rozstrój żołądka, przeziębienie, kac, silny stres [1,2,4–6].

Chorobą symulatorową nazywamy stan zbliżony do choroby lokomocyjnej, przy czym zasadniczą różnicą

jest mechanizm ich powstawania. Główną okolicznością wywołującą chorobę lokomocyjną jest ruch, czyli wystawienie organizmu na rzeczywiste bodźce, natomiast w chorobie symulatorowej mamy do czynienia z iluzją ruchu (*vection*). W dotychczasowych badaniach nie udało się jednoznacznie określić przyczyn występowania choroby symulatorowej. Wynika to ze złożonego charakteru bodźców. Najpowszechniejszą teorią jest, że podczas korzystania z symulatora informacje przekazywane do ośrodkowego układu nerwowego przez błędniki, narząd wzroku i proprioceptory są niezgodne ze statycznością symulatora i świadomością bezruchu u użytkownika. Stan ten wywołuje konflikt przedsionkowo-wzrokowy, a w rezultacie – zespół symptomów określanych mianem choroby symulatorowej [1,2,6].

Celem badań była ocena prawdopodobieństwa wystąpienia choroby symulatorowej podczas ćwiczeń w wirtualnej rzeczywistości oraz ocena wpływu niepożądanych objawów na efektywność szkolenia, jak również sprawdzenie, czy w środowisku pilotów wojskowych, w którym ćwiczenia są bardziej wymagające, choroba symulatorowa występuje równie często jak w środowisku pilotów cywilnych.

MATERIAŁ I METODY

W badaniu wzięło udział 48 pilotów różnych typów statków powietrznych. W czasie wykonywania zadań na symulatorach wszyscy posiadali ważne orzeczenia lotniczo-lekarskie, poświadczające brak przeciwwskazań do wykonywania samodzielnych lotów. Żaden z pilotów przed sesją symulatorową nie skarżył się na zły stan psychofizyczny. Średnia wieku mieściła się w przedziale 30–35 lat, przy czym najmłodszy z badanych miał < 25 lat, a najstarszy – > 45 lat. Trzydziestu dwóch pilotów spośród biorących udział w badaniu na co dzień kieruje wojskowymi statkami powietrznymi.

Ankietowani byli pilotami 4 typów statków powietrznych. Wśród nich znajdowało się:

- 17 pilotów śmigłowców (wojskowych),
- 15 pilotów samolotów wysokomanewrowych (wojskowych),
- 13 pilotów samolotów pasażerskich (cywilnych),
- 3 pilotów samolotów ultralekkich (cywilnych).

Zestawienie rodzajów statków powietrznych i wieku pilotów biorących udział w badaniu zostało przedstawione w tabeli 1.

Spśród biorących udział w badaniu 22 osoby (45%) można uznać za doświadczonych, gdyż odbyły powyżej 1000 godz. lotów w powietrzu. Najbardziej doświadczono-

Tabela 1. Wiek badanych i rodzaje pilotowanych statków powietrznych
Table 1. Respondents' age and the type of aircrafts

Wiek [w latach] Age [years]	Piloci Pilots [n]			
	samolotów wysokomanewrowych of high maneuverability aircraft	śmigłowców of helicopters	samolotów pasażerskich of airliners	samolotów ultralekkich of ultralight aircraft
< 25	11	0	5	0
25–30	3	0	3	1
30–35	0	6	2	2
35–40	1	5	1	0
40–45	1	5	0	0
45 >	0	1	2	0

Tabela 2. Rodzaje statków powietrznych i średnia liczby godzin ćwiczeń wykonanych przez pilotów biorących udział w badaniu
Table 2. The type of aircraft and the average number of hours of exercises performed by the pilots participating in the research

Rodzaj statku powietrznego Type of aircraft	Nalot [godz.] Total documented flight time [h]			
	symulator simulator		powietrze air	
	min.–maks. min.–max	M±SD	min.–maks. min.–max	M±SD
Samolot wysokomanewrowy / High maneuverability aircraft	100–460	245±105	350–1 200	637±266
Śmigłowiec / Helicopter	50–500	196±105	20–4 500	1 845±266
Pasażerski / Airliner	44–500	185±138	220–14 000	2 826±4 495
Ultralekki / Ultralight aircraft	5–60	32±28	65–440	235±190

ny pilot przebywał w powietrzu 14 000 godz., a pilot o najmniejszym doświadczeniu – 20 godz. Piętnastu ankietowanych (31%) spędziło ponad 200 godz. za sterami symulatora. Najmniejsza deklarowana liczba godzin spędzona w symulatorze wynosiła 5, a największa – 500. Przed badaniem 37 pilotów (77%) nie znało pojęcia choroby symulatorowej.

Zestawienie rodzajów statków powietrznych i średniej liczby godzin ćwiczeń na symulatorach wykonanych przez pilotów zostało przedstawione w tabeli 2.

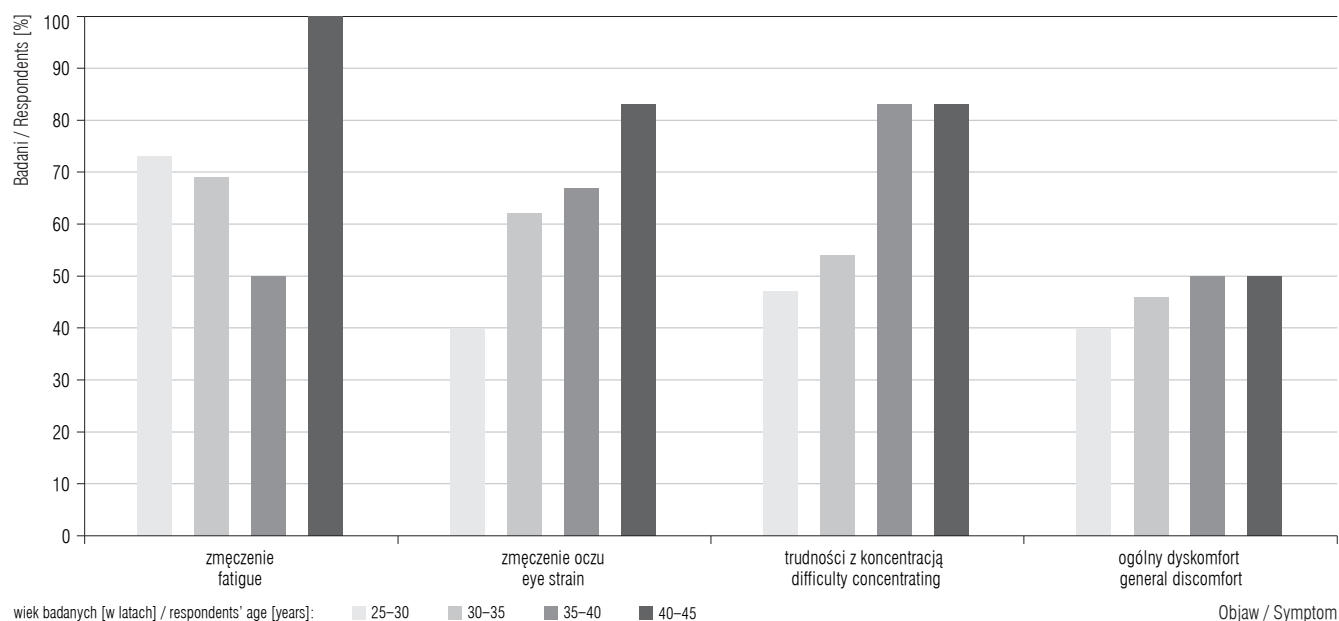
Metody

Chcąc ocenić prawdopodobieństwo wystąpienia choroby symulatorowej w czasie wykonywania ćwiczeń w rzeczywistości wirtualnej, wszystkich pilotów poproszono o wypełnienie ankiet, które zostały przygotowane w oparciu o *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) [7]

(załącznik 1). Ankiety były wypełniane po szkoleniach, podczas których wykorzystano symulatory. W związku z symulowaniem lotów różnymi typami statków powietrznych czas trwania poszczególnych sesji symulatorowych był zróżnicowany.

Symulatory projekcyjne wykorzystane podczas badań posiadały w pełni funkcjonalną i pełnowymiarową replikę kokpitu oraz system wizualizacji zapewniający płynny widok o wysokiej rozdzielczości, obrazujący sytuację przestrzenną poza kabiną.

Podczas sesji piloci „latali” w zróżnicowanych warunkach atmosferycznych, a profil ich misji był zależny od rodzaju statków powietrznych, których lot był symulowany. Zadania pilotów wojskowych polegały głównie na przechwytywaniu celów, wykonywaniu skomplikowanych manewrów oraz doskonaleniu zachowań w sytuacjach awaryjnych, natomiast piloci cywilni wykony-



Rycina 1. Objawy zgłaszane przez badanych podczas ćwiczeń na symulatorach
Figure 1. The symptoms reported by the respondents during simulator exercises

wali przede wszystkim loty w warunkach ograniczonej widoczności (na podstawie wskazań przyrządów pokładowych), treningi podchodzenia do lądowania, jak również ćwiczenia zachowań w sytuacjach awaryjnych.

WYNIKI

Podczas badania wyodrębniono poszczególne cechy charakterystyczne, według których skategoryzowano zebrane dane.

Wiek

Podobnie jak w przypadku choroby lokomocyjnej, wraz z wiekiem zwiększa się przystosowanie organizmu do oddziaływania wirtualnej rzeczywistości. Johnson [3] w swojej pracy zauważył, że w wieku 2–12 lat podatność na negatywne efekty wirtualnej rzeczywistości jest największa, następnie znacząco maleje ona w przedziale do 21 r.ż. Powyżej tego wieku spadek podatności jest już mniejszy. U osób, które przekroczyły 50 r.ż., występowanie choroby symulatorowej jest niezwykle rzadkie [3].

Autorzy niniejszego artykułu podczas badania również ustalili, że wraz z wiekiem pilota zmniejsza się jego podatność na chorobę symulatorową. Biorąc pod uwagę całą grupę respondentów, niezależnie od typu pilotowanego statku powietrznego, wysoki odsetek zmęczenia (73%) zaobserwowano u badanych w wieku 25–30 lat, następnie procent ten malał aż do wartości 69% dla przedziału 30–35 lat i do 50% – dla 35–40 lat. Aberracją

można zauważyć w przedziale 40–45 lat, gdyż wszyscy piloci w tej grupie wiekowej zgłaszali zmęczenie po sesjach symulatorowych.

Należy zwrócić uwagę, że dolegliwości takie jak zmęczenie oczu, trudności z koncentracją i ogólny dyskomfort wraz z wiekiem występowały częściej – przedstawiono to na rycinie 1.

Zróznicowane misje

Nie jest zaskoczeniem, że wraz ze wzrostem prędkości, zwiększeniem liczby manewrów czy lotami na niskiej wysokości obserwuje się zwiększenie podatności pilota na chorobę symulatorową. Ze względu na duże nagromadzenie bodźców wzrokowych, które muszą przetworzyć piloci wojskowych statków powietrznych, główne symptomy choroby to: zmęczenie oczu, trudności skupienia, zamazany obraz i utrata orientacji. W literaturze [8,9] zwraca się uwagę na wyraźną korelację pomiędzy wzrostem pobudzenia obszarów mózgu odpowiedzialnych za wzrok a odczuciem dyskomfortu u pilota, np. bólem głowy.

Piloci cywilni odczuwali negatywne skutki choroby w mniejszym stopniu, ponieważ ich profil lotu był spokojniejszy, wykonywany z mniejszymi prędkościami i w większej odległości od ziemi, przez co więcej informacji otrzymywali z przyrządów pomiarowych znajdujących się w kokpicie niż z systemu wizualizacji sytuacji przestrzennej.

Porównanie występowania objawów choroby symulatorowej podczas symulowania lotów wojskowych i cy-

Tabela 3. Objawy zgłaszane przez badanych podczas ćwiczeń na symulatorach statków powietrznych wojskowych i cywilnych
Table 3. The symptoms reported by the respondents during simulator exercises on military and civilian aircraft

Objaw Symptom	Badani Respondents [%]	
	symulator samolotu wojskowego military aircraft simulator	symulator samolotu cywilnego civilian aircraft simulator
Zmęczenie oczu / Eye strain	65	44
Trudności ze skupieniem się / Difficulty concentrating	59	38
Zamazany obraz / Blurred vision	38	25
Utrata orientacji / Loss of orientation	22	6

Tabela 4. Objawy zgłaszane przez badanych podczas ćwiczeń na symulatorach samolotu bojowego F16, śmigłowca, samolotu pasażerskiego i ultralekkiego
Table 4. The symptoms reported by the respondents during simulator exercises on F16 aircraft, helicopters, airliners and ultralight aircraft

Objaw Symptom	Badani Respondents [%]			
	samolot F16 F16 aircraft	śmigłowiec helicopter	samolot pasażerski airliner	samolot ultralekki ultralight aircraft
Zmęczenie / Fatigue	87	53	62	100
Ból głowy / Headache	20	18	23	33
Zmęczenie oczu / Eye strain	67	65	23	100
Trudności ze skupieniem się / Difficulty concentrating	67	53	23	100
Ogólny dyskomfort / General discomfort	40	41	23	100
Zamazany obraz / Blurred vision	20	53	15	67
Zwiększona potliwość / Sweating	60	47	38	67

wilnych statków powietrznych zostało przedstawione w tabeli 3.

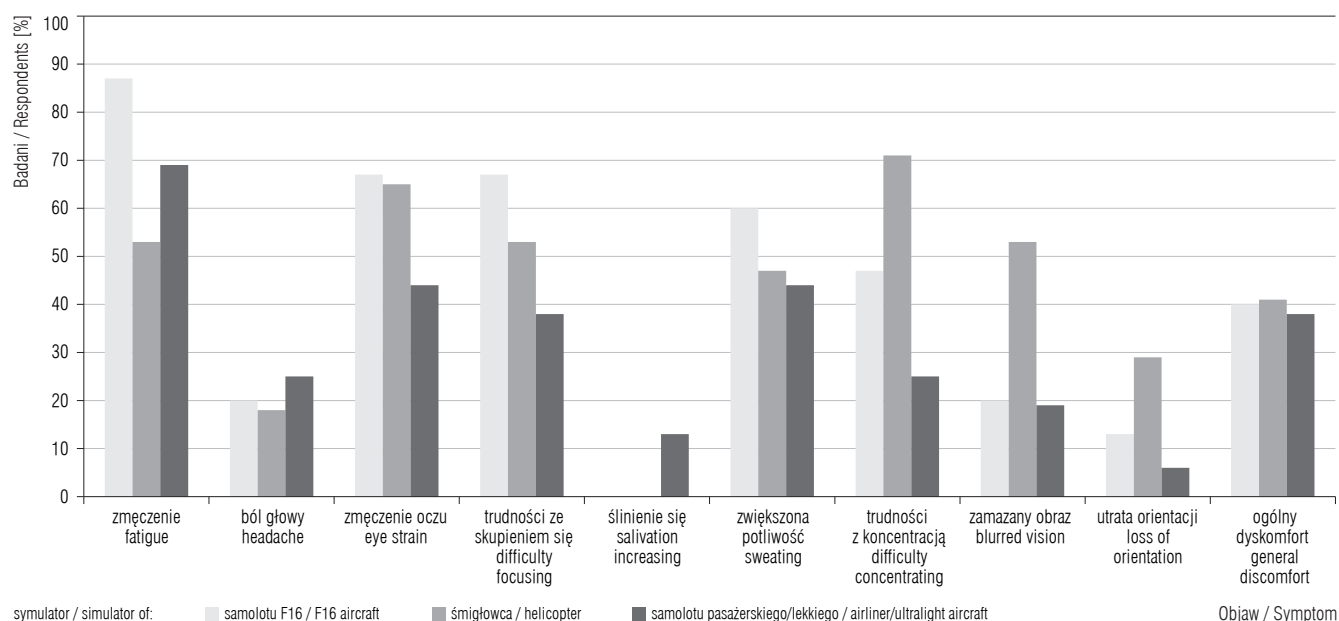
Istotne znaczenie ma również czas trwania 1 sesji symulatorowej. W przypadku gdy trening trwał dłużej niż 60 min, aż 85% badanych – niezależnie od tego, jakiego statku powietrznego lot był symulowany – odczuwało większe zmęczenie, podczas gdy w sesjach trwających poniżej 1 godz. taką dolegliwość odczuło tylko 33% respondentów.

Rodzaj statku powietrznego

W literaturze [10] omawia się wyniki badań, według których najwięcej symptomów choroby symulatorowej występuje u pilotów śmigłowców. Jest to prawdopodobnie spowodowane lotami na niskich wysokościach z widokiem na zmieniające się podłoże. Autorzy niniejszego artykułu nie mogą potwierdzić takich danych, z ich

badań wynika bowiem, że piloci śmigłowców i samolotów F16 doświadczyli choroby symulatorowej w podobnym stopniu; można nawet stwierdzić, że to piloci samolotów wysokomanewrowych bardziej odczuli jej skutki. Negatywny wpływ na stan psychofizyczny w największym stopniu dotyczył pilotów samolotów ultralekkich. Najmniej dolegliwości wydaje się wywoływać symulator samolotów pasażerskich. W tabeli 4 zestawiono objawy choroby podczas ćwiczeń na symulatorach: samolotu bojowego F16, śmigłowca, samolotu pasażerskiego i ultralekkiego.

Pomimo rygorystycznych badań dopuszczających do lotu oraz wymagających ćwiczeń adaptacyjnych największe nasilenie symptomów choroby symulatorowej można zauważyć u pilotów wysokomanewrowych statków powietrznych i śmigłowców – choć są to w większości przypadków objawy określane jako rzad-



Rycina 2. Objawy u badanych w zależności od rodzaju symulowanego statku powietrznego

Figure 2. Respondents' symptoms depending on types of aircraft simulators

ko występujące. Procentowe zestawienie symptomów w zależności od symulowanego statku powietrznego przedstawiono na rycinie 2. Uwzględnione zostały wyniki badań dotyczące wszystkich 4 grup pilotów, jednak pilotów samolotów pasażerskich i maszyn ultralekkich połączono w jedną grupę z uwagi na podobieństwo wykonywanych ćwiczeń/manewrów.

Podatność na chorobę lokomocyjną

Zauważono, że osoby, które są podatne na chorobę morską czy lokomocyjną, z dużym prawdopodobieństwem zachorują również na chorobę symulatorową. Wystąpienie objawów podczas jednej sesji w wirtualnej rzeczywistości predysponuje daną osobę do ponownego odczuwania dolegliwości w czasie następných ćwiczeń [3].

OMÓWIENIE

Symulatory są ważną częścią szkolenia lotniczego. Umożliwiają doskonalenie umiejętności w warunkach niesprzyjającej pogody, pozorują niebezpieczne sytuacje w przestrzeni, nie narażając ani statków powietrznych, ani zdrowia i życia samych pilotów. Czy choroba symulatorowa wpływa na szkolenie pilotów? Niewątpliwie stanowi ona przeszkodę, ale możliwą do pokonania; jej skutki można co najmniej zminimalizować.

Wystąpienie objawów, które byłyby wskazaniem do zakończenia treningu, zdarza się niezwykle rzadko.

Wszystkie osoby biorące udział w badaniu ukończyły swoją sesję. Negatywny wpływ choroby symulatorowej na efektywność szkolenia lotniczego nie jest więc duży. Biorąc pod uwagę zalety – bezpieczeństwo pilota i maszyny, redukcję kosztów, trening wielu wersji zdarzeń, oraz to, że ewentualne niedogodności nie zagrażają trwale zdrowiu, można stwierdzić, że szkolenie symulatorowe jest potrzebne i jak na razie niezastąpione. Oczywiście należy się zastanowić, czy obecnie, przy tak powszechnym dostępie do wirtualnej rzeczywistości, wobec zwiększonej liczby użytkowników nie pojawią się kolejne, poważniejsze objawy choroby symulatorowej.

Ocena procesów zachodzących w organizmie podczas konfliktu przedsionkowo-wzrokowego jest niezwykle złożona i zależy od indywidualnych predyspozycji użytkowników symulatorów. Ponadto oszacowanie możliwości wystąpienia choroby symulatorowej u pilotów cywilnych i wojskowych nie jest proste. Wpływa na to szereg czynników. Od pilotów wojskowych wymaga się większej odporności na sytuacje stresogenne, pracy w każdych warunkach pogodowych, ale również wykonywania lotów na małej wysokości przy dużych prędkościach, co sprzyja występowaniu objawów choroby. Piloci cywilni ćwiczą loty z punktu A do punktu B bez zbędnego manewrowania, przez co ich profil lotu jest spokojniejszy, wykonywany przy mniejszej prędkości i większej odległości od ziemi. Otrzymują, jak już podano, więcej informacji z przyrządów pomiarowych znajdujących się w kokpicie niż z systemu wizualizacji sytu-

Tabela 5. Rodzaje symulowanych statków powietrznych i sesje symulatorowe w roku
Table 5. The types of aircraft and simulator sessions in a year

Rodzaj statku powietrznego Type of aircraft	Sesje symulatorowe Simulator sessions [n]	
	min.–maks. min.–max	M±SD
Samolot wysokomanewrowy / High maneuverability aircraft	60–96	76±21
Śmigłowiec / Helicopter	1–84	50±25
Pasażerski / Airliner	48–84	52±23
Ultralekki / Ultralight aircraft	24–60	44±18

acji przestrzennej. W związku z tym mniejsza była ich podatność na chorobę symulatorową. Co więcej, biorący udział w badaniu piloci samolotów pasażerskich byli najbardziej doświadczoną grupą, co mogło zwiększyć ich odporność na negatywny wpływ rzeczywistości wirtualnej. Choroba symulatorowa pozostaje jednak w dużej mierze indywidualnym odczuciem, nikomu nie udało się więc dotąd udowodnić, że pilot wojskowy będzie ją nosił lepiej niż pilot cywilny i odwrotnie.

W literaturze [11] omawia się badania, według których wraz ze wzrostem nalotu pilotów w warunkach rzeczywistych występuje nasilenie objawów choroby symulatorowej, podczas gdy piloci z małym doświadczeniem są bardziej odporni na jej negatywne skutki. Dodatkowo wysoka rozdzielczość wyświetlaczy i coraz wyższa jakość wykonania symulatorów ułatwia wprowadzenie świadomości pilota w błąd, że znajduje się on w rzeczywistym statku powietrznym. Złudzenie to wymusza na organizmie pilota reakcje na bodźce odczuwane każdorazowo podczas lotu (przyspieszenie, zmienność położenia względem ziemi itp.). Autorzy tłumaczą to przyzwyczajaniem się systemu percepcyjnego do warunków, których doświadcza on częściej – czyli towarzyszących lotom rzeczywistym. Z badań przeprowadzonych przez autorów niniejszego artykułu wynika, że piloci wraz z wiekiem oraz doświadczeniem są bardziej odporni na skutki choroby symulatorowej. Zmęczenie odczuwały w największym stopniu osoby w wieku 25–30 lat (73%), piloci wysokomanewrowych statków powietrznych (aż 87%) i osoby, które na symulatorach wylatały mniej niż 250 godz. (72%). We wszystkich wymienionych grupach może być to spowodowane liczbą godzin spędzanych w symulatorach, użytkowanych coraz częściej, jak i zwiększaniem liczby godzin przeznaczonych na trening symulatorowy. Zestawienie rodzajów statków powietrznych i liczby sesji w roku przedstawiono w tabeli 5.

Według badania autorów niniejszego artykułu małe doświadczenie pilotów samolotów ultralekkich zarówno w lotach symulowanych, jak i rzeczywistych najprawdopodobniej znacząco negatywnie wpłynęło na psychofizyczny stan badanych.

Potwierdziły się również spostrzeżenia z pracy Johnson [3] dotyczące spadku występowania zmęczenia związanego z wyższym wiekiem pilotów. Należy zaznaczyć, że wraz z wiekiem wzrasta doświadczenie i tym można tłumaczyć uodpornienie się na bodźce płynące z wirtualnej rzeczywistości. Aberracja w grupie wiekowej 40–45 lat może wynikać z rodzaju statku powietrznego, ponieważ 5 na 6 pilotów z tej grupy wykonywało loty na symulatorach śmigłowców bojowych.

Nasilenie objawów takich jak wymienione wcześniej zmęczenie oczu, trudności z koncentracją oraz ogólnego dyskomfortu prawdopodobnie wynika ze standardowych zmian zachodzących w organizmie wraz z wiekiem – pogorszenia skutecznej koncentracji wzroku przez długi czas i zmniejszonej odporności na niewygodę.

Tak jak w literaturze [12,13], w badaniach autorów niniejszego artykułu również wykazano, że wraz z czasem trwania szkolenia symulatorowego wzrasta nasilenie objawów. W przypadku gdy czas trwania treningu był dłuższy niż 60 min, aż 85% badanych, niezależnie od typu statku powietrznego, odczuwało zwiększone zmęczenie, podczas gdy w sesjach trwających poniżej 1 godz. podobną dolegliwość odczuło tylko 33% respondentów. Inne dolegliwości również wyraźnie wzmagają się po 60 min trwania sesji symulatorowej: odsetek pilotów odczuwających trudności ze skupieniem wzroku wzrósł z 20% do 67%, a ogólny dyskomfort pilotów – z 27% do 45%.

Istnieje szereg czynników zwiększających prawdopodobieństwo zachorowania na chorobę symulatorową, m.in. przeziębienie, przyjmowane leki, brak snu oraz ogólnie pojmowane zmęczenie. W literaturze [8,11,14,15]

opisuje się zasady postępowania w celu ograniczenia występowania choroby symulatorowej, np.:

1. Loty z użyciem symulatorów nie powinny być planowane w tych samych dniach co szkolenie lotnicze na rzeczywistych statkach powietrznych.
2. Z symulatorów mogą korzystać tylko piloci zdrowi, którzy są w dobrej kondycji psychofizycznej.
3. Osoby niemające wcześniej kontaktu z symulatorem lub po długiej przerwie są w grupie ryzyka wystąpienia choroby.
4. Nie powinno się planować ćwiczeń na symulatorze dłuższych niż 2 godz.
5. Należy robić przerwy.
6. Sesja symulatorowa powinna być tym krótsza, im jest intensywniejsza.
7. Każdorazowo przed zresetowaniem lub zastopowaniem misji pilot powinien zamknąć oczy do czasu ponownego uruchomienia zadania.
8. Po zakończeniu ćwiczenia pilot powinien wysiąść z symulatora dopiero po wyłączeniu wizualizacji przestrzennej i oświetlenia kabiny.

Ponadto w każdym przypadku wystąpienia objawów pilot powinien powiadomić o tym instruktora.

WNIOSKI

1. Spośród ankietowanych pilotów około 2/3 uległo zmęczeniu, a 1/3 odczuwa zmęczenie podczas sesji symulatorowych częściej niż rzadko.
2. Szczególne nasilenie objawów choroby symulatorowej zaobserwowano wśród pilotów szkolonych na samolotach bojowych.
3. Zastanawiająca i niepokojąca zarazem jest znikoma wiedza na temat choroby symulatorowej u pilotów, ponieważ aż 37 z 48 badanych nie wiedziało o tej chorobie, a nawet 40 nie potrafiło wskazać symptomów choroby symulatorowej.
4. W związku z coraz większą ekspozycją organizmu człowieka na rzeczywistość wirtualną wydaje się zasadne informowanie ludzi korzystających z symulatorów o występowaniu tej choroby i metodach radzenia sobie z jej objawami.

PIŚMIENNICTWO

1. Kluch W.: Badania fizjologiczne przebiegu restytucji narządu przedsionkowego u osób poddawanych przyspieszeniom w symulatorze GYRO IPT. *Pol. Przegl. Med. Lotn.* 2003;4:399–415
2. Duh H.B., Parker D.E., Philips J.O., Furness T.A.: "Conflict-ing" motion cues to the visual and vestibular self-motion

- systems around 0.06 Hz evoke simulator sickness. *Hum. Factors* 2004;46(1):142–153, <https://doi.org/10.1518/hfes.46.1.142.30384>
3. Johnson D.M.: Introduction to and Review of Simulator Sickness Research. Technical Report 1832. United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, Arlington 2005
4. Gradwell D.P., Rainford D.J.: *Ernsting's Aviation and Space Medicine*. CRC Press, Boca Raton 2016, ss. 782–783, <https://doi.org/10.1201/b13197>
5. Stanney K.M., Kennedy R.S., Drexler J.M.: Cybersickness is not simulator sickness. *Proc. Hum. Ergon. Soc. Annu. Meet.* 1997;41(2):1138–1142, <https://doi.org/10.1177/107118139704100292>
6. Biernacki M., Dziuda Ł.: Choroba symulatorowa jako realny problem badań na symulatorach. *Med. Pr.* 2012; 63(3):377–388
7. Kennedy R.S., Lane N.E., Berbaum K.S., Lilienthal M.G.: Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *Int. J. Aviat. Psychol.* 1993;3(3):203–220, https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
8. Bruck S., Watters P.A.: The factor structure of cybersickness. *Displays* 2011;32(4):153–158, <https://doi.org/10.1016/j.displa.2011.07.002>
9. Gerwig M., Niehaus L., Kastrup O., Stude P., Diener H.C.: Visual cortex excitability in migraine evaluated by single and paired magnetic stimuli. *Headache* 2005;45(10):1394–1399, <https://doi.org/10.1111/j.1526-4610.2005.00272.x>
10. Webb C.M., Bass J.M., Johnson D.M., Kelley A.M., Martin C.R., Wildzunas R.M.: Simulator Sickness in a Helicopter Flight Training School. *Aviat. Space Environ. Med.* 2009;80(6):541–545, discussion 546, <https://doi.org/10.3357/ASEM.2454.2009>
11. Virre E., Clark J.B.: *Airsickness and Space Sickness*. W: Kennedy C.H., Kay G.G. [red.]. *Aeromedical Psychology*. ASHGATE, Surrey England 2013, ss. 195–213
12. Kennedy R., Stanney K.M., Dunlap W.: Duration and exposure to virtual environments: sickness curves during and across sessions. *Presence* 2000;9(5):463–472
13. Lackner J.R., Larry R.S.: *Motion sickness*. W: Squire R. [red.]. *Encyclopedia of Neuroscience*. Academic Press, Oxford 2009, ss. 989–993
14. Kolasinski E.M.: *Simulator Sickness in Virtual Environments*. Technical Report 1027. United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, Alexandria 1995
15. Kennedy R.S., Lilienthal M.G., Berbaum K.S., Baltzley D.R., McCauley M.E.: *Simulatorsickness in U.S. Navy flight simulators*. *Aviat. Space Environ. Med.* 1989;60(1):10–16

Załącznik 1. Ankieta użyta w badaniu
Appendix 1. The questionnaire used in the research

ANKIETA

Szanowni Państwo!

Chciałbym prosić o udział w ankiecie dotyczącej wpływu wirtualnej rzeczywistości na człowieka. Dane, które z niej uzyskam, pozwolą mi w napisaniu pracy dotyczącej odporności na chorobę symulatorową. Ankieta jest anonimowa. Wypełnienie ankiety polega na wybraniu i zaznaczeniu (kółkiem) poprawnych odpowiedzi lub udzieleniu krótkich odpowiedzi. Za wypełnienie ankiety serdecznie dziękuję.

Płeć:

kobieta mężczyzna

Wiek [lat]:

...–25 25–30 30–35 35–40 40–45 45–...

Nalot (w godzinach):

w powietrzu: na symulatorze:

Częstość ćwiczeń na symulatorze:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7/tydz. 5, 7, 10, 15, 20/mc

Średnia długość trwania jednej sesji symulatorowej [min]:

10–20 20–40 40–60 60–...

Czy słyszał/a Pan/Pani o chorobie symulatorowej?

tak nie

Czy zna Pan/Pani objawy choroby symulatorowej?

tak nie

Jeśli tak, to jakie?

Czy kiedykolwiek, podczas sesji symulatorowej, odczuł/a Pan/Pani:

zmęczenie	w ogóle	rzadko	czasem	często
ból głowy	w ogóle	rzadko	czasem	często
zmęczenie oczu	w ogóle	rzadko	czasem	często
trudności skupienia	w ogóle	rzadko	czasem	często
nadmierne wydzielanie śliny	w ogóle	rzadko	czasem	często
pocenie się	w ogóle	rzadko	czasem	często
mdłości	w ogóle	rzadko	czasem	często
trudności z koncentracją	w ogóle	rzadko	czasem	często
zamazany obraz	w ogóle	rzadko	czasem	często
zawroty głowy	w ogóle	rzadko	czasem	często
utratę orientacji	w ogóle	rzadko	czasem	często
„sensacje” żołądkowe	w ogóle	rzadko	czasem	często
ogólny dyskomfort	w ogóle	rzadko	czasem	często

Czy objawy te (jeśli wystąpiły) mogły być spowodowane:

chorobą (przeziębienie, grypa)	tak	nie
alergią	tak	nie
zmęczeniem	tak	nie
przyjmowaniem leków	tak	nie
kacem	tak	nie

Na podstawie / Based on: Kennedy R.S. i wsp. / et al.: Simulator Sickness Questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness [7].

Ten utwór jest dostępny w modelu open access na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – Użycie niekomercyjne 3.0 Polska / This work is available in Open Access model and licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Poland License – <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/pl>.

Wydawca / Publisher: Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Łódź

4. Oświadczenia o współautorstwie.

5. Publikacja 2.

EFFECT OF UNMANNED AERIAL VEHICLE MISSION DIFFICULTY LEVEL ON PILOT'S AUTONOMIC NERVOUS SYSTEM

PRZEMYSŁAW WOJCIECHOWSKI¹, KONRAD WOJTOWICZ¹, and JAN BŁASZCZYK²

¹ Military University Of Technology, Warsaw, Poland

Faculty of Mechatronics, Armament and Aerospace

² Calisia University, Kalisz, Poland

Faculty of Health Sciences

Highlights

- Flight simulator directly induces stressful stimuli that affect the subject's body.
- Activation of the sympathetic nervous system increases proportionally with rising mission difficulty.
- Visual-motor reaction time decreases as mission difficulty increases.

Abstract

Objectives: The aim of this article is to investigate the psychophysiological responses of unmanned aerial vehicle (UAV) pilots during flight simulations with high mission complexity. In particular, it focuses on the responses of the sympathetic and parasympathetic parts of the autonomic nervous system. **Material and Methods:** Fourteen pilots aged 26–31 years took part in the study. The research was conducted using a UAV flight simulator. During the test, data was collected from electrocardiogram sensor and piezoelectric (lead zirconate titanate – PZT) respiration sensor as well as the pilot's mission performance was assessed. In addition, the test subjects were subjected to a simple reaction speed test after the completed exercise. **Results:** For missions classified as having low difficulty, the mean RR interval (meanRR) was 1004.03 milliseconds, with a standard deviation (SD) = 18.5 ms. This corresponds to an mean heart rate of about 59.8 bpm (SD = 1.1), which is 16.9% longer than the RR intervals observed during high difficulty missions (meanRR±SD 859±59.75 ms). The values of respiratory rate per minute for the different levels of difficulty were M±SD 17.3±0.87 for low, 18.1±1.04 for medium, and 18.8±0.41 for high mission difficulty. **Conclusions:** A correlation between the effects of an unmanned aircraft flight simulator and the pilot's body was proven. By means of tests using electrocardiogram, PZT and reaction time measurements, it was proven that the flight simulator directly induces stressful stimuli that affect the subject's body. By analyzing the individual results, it was also proven that the sympathetic part of the nervous system is activated as the level of mission difficulty increases. *Int J Occup Med Environ Health.* 2025;38(4):391–404

Key words:

pilot, ECG, flight simulator, autonomic nervous system, UAV, PZT

INTRODUCTION

The development and popularization of unmanned aerial vehicles (UAVs) have revolutionized many fields. Both military missions and civilian operations are carried out with their help. With the increasing number of UAVs and the complexity of the missions performed by pilots, the

need to understand the psychophysiological reactions in the pilots' bodies has been recognized. Understanding the aspects involved appears to be key to optimizing the performance and safety of the flights performed. This article focuses on the responses of the sympathetic and parasympathetic parts of the autonomic nervous system to the im-

Received: April 13, 2025. Accepted: August 20, 2025.

Corresponding author: Przemysław Wojciechowski, Military University of Technology, Faculty of Mechatronics, Armament and Aerospace, gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland (e-mail: przemyslaw.wojciechowski@wat.edu.pl).

pact of a flight simulation of an unmanned aircraft with a high level of mission complexity [1–4].

The research is important because of its potential implications for drone pilot performance and accident prevention in general. Activating the sympathetic or parasympathetic nervous system is important for stress response, decision-making, and cognitive function. Understanding these responses regarding UAV piloting can provide clues to the physiological factors contributing to drone accidents and help develop accident prevention strategies.

Most research focuses on analyzing pilots' physiological responses during manned flight. Research targeting unmanned aerial vehicle pilots needs more attention with the increased frequency of UAVs use and future co-functioning with manned aviation.

The extant literature contains a paucity of research specifically addressing UAVs pilots, and, in particular, the response of their autonomic nervous systems to simulation-generated stimuli. A number of studies have been conducted on driving simulators [5–7], however, in this instance, the nature of the simulation is distinct. The simulator sessions, which are characterized by their monotony, do not accurately reflect the exercises that involve the use of simulators to pilot unmanned racer aircraft with first person view (FPV) imaging. As indicated in the literature, references to the psychophysical state of pilots during flight simulator training principally pertain to pilots of manned aircraft [8,9]. A plethora of studies have been conducted on the effects of flight simulators on various physiological parameters, including heart rate (HR), heart rate variability (HRV), respiration, and electroencephalogram (EEG). However, the majority of these studies have concentrated on the changes in these parameters in response to the workload levels of pilots [10,11], rather than on the difficulty level of the mission itself [8].

This study aims to fill these gaps in the literature. The authors assessed and compared the sympathetic and parasympathetic nervous system responses of drone pilots flying missions of varying difficulty levels. Through this re-

search, the authors want to highlight the psychophysiological challenges that drone pilots face in their daily work.

The autonomic nervous system

The autonomic nervous system is divided into the sympathetic and parasympathetic systems. These systems occur both at rest and during stressful situations. Their reactions are reciprocal; when one is activated, the other becomes quieter [12,13].

Mechanisms of action of the sympathetic nervous system

The sympathetic nervous system is responsible for the body's responses in stressful and threatening situations. It works on a fight-or-flight basis and influences many physiological functions, including breathing and the cardiovascular system [14–16]:

- neurotransmitters
 - norepinephrine is the sympathetic nervous system's primary neurotransmitter, released from nerve endings, and affects various adrenergic receptors in target tissues,
 - adrenaline is released from the adrenal medulla into the bloodstream, enhancing norepinephrine's action, adrenergic receptors,
 - α -adrenergic receptors are responsible for vasoconstriction, leading to increased blood pressure,
 - β -adrenergic receptors have different functions depending on the type β_1 -adrenergic receptors (β_1 -AR): increases heart rate (chronotropic), the strength of heart contractions (inotropic), and conduction of impulses (dromotropic), β_2 -adrenergic receptors (β_2 -AR) causes bronchodilation (bronchodilation) and smooth vascular muscle relaxation (in skeletal muscle areas),
- changes in respiratory parameters
 - bronchodilation: the effect on β_2 -AR causes bronchial smooth muscle relaxation, leading to increased airflow through the airways,

- increase in respiratory rate: an increase in sympathetic activity increases respiratory rate, allowing faster delivery of oxygen to the tissues and removing carbon dioxide,
- changes in cardiovascular parameters
 - increase in heart rate: norepinephrine acting on β_1 -AR in the heart leads to accelerated heart rate (tachycardia),
 - increased strength of heart contractions: the action of norepinephrine on β_1 -AR increases the strength of heart contractions, leading to an increase in stroke volume and cardiac minute volume,
 - vasoconstriction: norepinephrine acting on α -adrenergic receptors causes vasoconstriction, increasing peripheral resistance and blood pressure,
 - redirection of blood flow: the vasoconstriction of blood vessels in areas that are not relevant at the moment (e.g., skin, digestive system) and the vasodilation of vessels in key areas (e.g., skeletal muscles, heart) enables the body to use its energy resources in stressful situations optimally.
- bronchospasm is an action on muscarinic receptors that causes bronchial smooth muscle contraction, decreasing airflow through the airways,
- decrease in respiratory rate: a decrease in sympathetic nervous system activity and an increase in parasympathetic activity results in a decrease in respiratory rate, contributing to energy conservation and recovery,
- changes in cardiovascular parameters
 - decrease in heart rate: acetylcholine acting on muscarinic receptors in the heart leads to a slowing heart rate (bradycardia),
 - decrease in the strength of heart contractions: the action of acetylcholine on muscarinic receptors causes a decrease in the strength of heart contractions, leading to a decrease in ejection volume and cardiac minute volume,
 - vasodilation: acetylcholine acting on muscarinic receptors in blood vessels causes smooth muscle relaxation, leading to vasodilation and decreased peripheral resistance,
 - increased blood flow to the digestive organs: an increase in parasympathetic activity redirects blood flow to the digestive system, promoting digestion and nutrient absorption.

Mechanisms of action of the parasympathetic nervous system

The parasympathetic nervous system acts in opposition to the sympathetic nervous system. It is responsible for restoring and maintaining the body's homeostasis and the "rest and digest" response [14–16]

- neurotransmitters
 - acetylcholine is the parasympathetic neurotransmitter released from nerve endings and affects cholinergic receptors in target tissues,
- cholinergic receptors
 - muscarinic receptors are responsible for most of the effects of acetylcholine in the parasympathetic system,
 - nicotinic receptors can be found mainly in autonomic ganglia and skeletal muscles,
 - changes in respiratory parameters,

MATERIAL AND METHODS

Experimental participants

The study was conducted on a group of 14 male UAVs pilots, individuals with varying piloting skills. However, in order to create the study group, an effort was made to select individuals with similar experience of flying UAVs. Furthermore, it was observed that the pilots primarily flew UAVs of the same type. The mean age of the subjects was 27.1 years old, with the youngest pilot being 26 years old and the oldest 31 years old. Each subject reported no psycho-physical complaints at the time of testing that could potentially affect test results. The test subjects never experienced symptoms of motion sickness. The subjects



Photo: Przemysław Wojciechowski

Figure 1. BITalino PsychoBIT module used in the research on group of 14 male unmanned aerial vehicles pilots, Military University of Technology, Warsaw, Poland, April 2025

were rested on the day of testing, had not taken any medication or alcohol, and had not exercised before testing (so as not to artificially affect cortisol levels). In addition, all had previous experience flying unmanned quadcopter aircraft using the FPV system and the Liftoff simulator. The execution of the study was preceded by the issuance of consent to conduct the study by the Bioethics Committee at the Military Medical Chamber in Warsaw (Resolution No. 20/23 of the Bioethics Committee at the Military Medical Chamber in Warsaw dated July 14, 2023 on issuing an opinion on the medical experiment project).

Software and apparatus used in the study

The study used Liftoff, an existing UAV racing drone simulator. The system uses advanced drone models validated through empirical testing and computational fluid dynamics (CFD) simulations. In addition, the simulated drones are configurable, and their components are designed according to factual specifications, which makes the simulated flights highly realistic [17,18].

The drone simulator was run on a Dell Precision laptop (Dell, Round Rock, TX, USA) (13th generation Intel(R) Core(TM)

i9-13950HX 2.20 GHz [Intel, Santa Clara, CA, USA]; 64 GB RAM; NVIDIA RTX 3500 [NVIDIA Corporation, Santa Clara, CA, USA]) with Windows 11 Pro (Microsoft, Redmond, WA, USA) operating system.

The BITalino PsychoBIT kit (BITalino, Lisbon, Portugal) was used for biomedical data acquisition (Figure 1). The tests focused on measuring heart rate variability and the pilot's respiratory signals.

Each time after the flight, the pilot performed an additional test to check reaction time (visual-motor RT). The test was conducted using a program available on the Arealme website [19].

The BITalino PsychoBIT kit consists of a main chip, the BITalinoCore BT, which allows Bluetooth communication with a computer to collect measurements. The BITalinoCore BT has six analog channels that allow the connection of sensors such as electrocardiogram (ECG) sensor, electrodermal activity (EDA) sensor, piezoelectric (lead zirconate titanate – PZT) respiration sensor, pulse sensor, and others [20].

Electrocardiogram and PZT sensors were used in the study. Figure 2 shows an example of electrode placement and the BITalino module.

The basic technical parameters of the ECG sensor are [21,22]:

- gain 1100 – determines how much the input signal will be amplified before processing,
- range ± 1.5 mV – the range of voltages the sensor can record, with a supply voltage of 3.3 V,
- frequency response 0.5–40 Hz – the minimum and maximum frequency of the signals the sensor can record,
- power consumption ~ 0.17 mA – the current consumed by the sensor during operation,
- input voltage range 2.0–3.5 V – the supply voltage at which the sensor operates correctly,
- input impedance 7.5 G Ω – the input resistance of the sensor,
- interference suppression index 86 dB – the system's ability to attenuate the same noise on both signal inputs.

Respiratory sensor

The PZT sensor can determine whether the subject inhales or exhales. It is housed in a flexible band that can be adjusted to fit the user's chest. Its electrical output signal in proportion to the mechanical stress acting under the rising or falling of the human chest.

The parameters of the PZT sensor are:

- reinforcement 1,
- range ± 1.5 V,
- frequency response 0.59–0.9 Hz,
- power consumption 35 μ A [23–25].

Research procedure

Three maps with different levels of difficulty were selected for the survey. The pilots unanimously labeled each route profile according to easy, medium, and difficult categories. Pilot had to pass all the checkpoints as quickly as possible during each test. Missing any point prevented completion of the test. Each time the pilot performed a mission, he was connected to an ECG and a PZT sensor. Data from the ECG and PZT sensors were recorded during each flight and entered into computer memory. After completing the task, the participant performed a visual-motor RT test 5 times. The ECG and PZT were not measured during the test. This was due to the dynamic nature of the visual-motor RT test, which could have distorted the results. It was followed by a 10-minute rest, after which the test subject was asked to repeat the test at a given level of route difficulty. Nevertheless, in order to mitigate the potential impact of pilot fatigue on their ability to pilot the aircraft, it was imperative to discontinue the tests if the pilot exhibited signs of fatigue or self-reported fatigue. The subsequent day's tests were scheduled for the afternoon, ensuring a consistent and uninterrupted evaluation process. Each pilot performed 10 flights on each of the 3 routes, which allowed data from 420 flights to be analyzed. Parameters directly reflecting the heart rhythm were selected to interpret the ECG results. The analysis focused

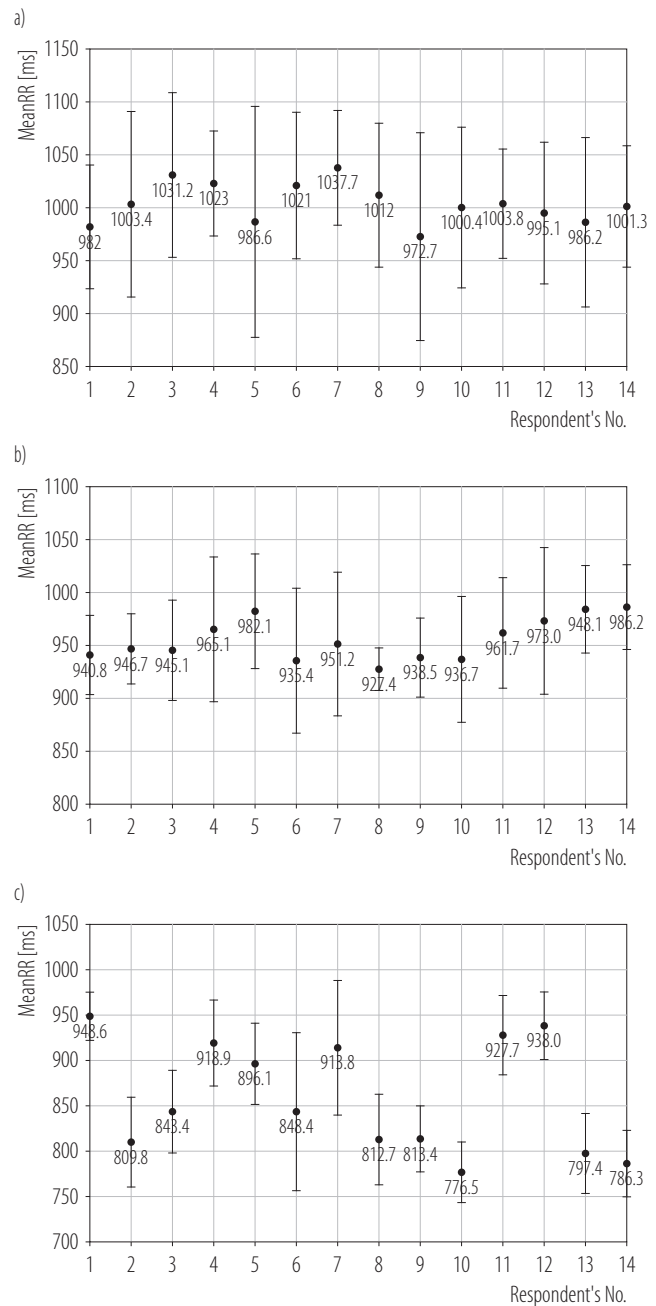


Figure 2. The mean RR interval (meanRR) of individual respondents at a) low, b) medium, and c) high level of mission difficulty, in the research on group of 14 male unmanned aerial vehicles pilots (mean age 27.1 years), Military University of Technology, Warsaw, Poland, April 2025

on measurements taken in both the frequency and time domains. Table 1 shows the parameters analyzed with an explanation of their significance.

Table 1. List of heart rate variability parameters and their significance [26–29]

Parameter	Meaning
Heart rate variability	
time domain	
minRR	minimum temporal interval between consecutive vertices R [ms]
maxRR	maximum temporal interval between consecutive vertices R [ms]
meanRR	mean of the temporal intervals R to R [ms]
SDRR	standard deviation of the mean of the temporal intervals R to R [ms]
meanHR	mean heart rate [bpm]
RR20	number of differences between consecutive R to R intervals >20 ms
pRR20	percentage of differences >20 ms [%]
RR50	number of differences between consecutive N to N intervals >50 ms
pRR50	percentage of differences >20 ms [%]
frequency domain	
LF power	value of the spectral power density for the low-frequency band to the total spectral power [%]
HF power	value of the spectral power density for the high-frequency range to the total spectral power [%]
TOTAL power	total spectral power from the distribution [ms^2/Hz]
LF/HF	ratio of the spectral power value in the low-frequency range to the spectral power in the high-frequency range
Respiratory	
RESP FREQ	respiratory rate based on the entire sensor signal [breaths/min]
FREQ	frequency for the maximum value from the power density distribution of the signal spectrum

Parameters directly reflecting the respiratory system were selected to interpret the PZT results. Parameters in the frequency domain determining respiratory and frequency from the spectral power density distribution were extracted as the most authoritative. Table 1 shows the parameters analyzed with an explanation of their significance.

RESULTS

First, the results are presented by the mission difficulty level. The following section presents a summary of the results and how they compare to each other.

A tabular summary of the measurements' results was made for each difficulty level. Each pilot is represented by one row, showing the arithmetic average of the results obtained in the 10 measurement sessions performed at each mission difficulty level.

Low level of mission difficulty

The mean RR value (meanRR) (Table 2, Figure 2a) from all measurements was $M \pm SD$ 1004.1 \pm 71.7 ms. It corresponds to almost 60 bpm. The mean value of the spectral power density for the high-frequency (HF) range to the total spectral power of 3095.6% and the mean ratio of the spectral power values in the low-frequency (LF) range to the spectral power in the HF range of 0.26 indicate parasympathetic nervous system activity.

The value of the number of breaths per minute with the easy path profile was $M \pm SD$ 17.3 \pm 0.87, a level corresponding to the number of breaths performed under normal conditions.

Medium level of mission difficulty

The meanRR (Table 2, Figure 2b) from all measurements was $M \pm SD$ 955.3 \pm 49.7 ms. It corresponds to almost 63 bpm. The mean value of the spectral power density for the HF range to the total spectral power of 859.2%, as well as the mean ratio of the spectral power values in the LF range to the spectral power in the HF range of 0.9, indicate a balanced activity of the sympathetic and parasympathetic parts of the nervous system.

The value of the number of breaths per minute with the mean path profile was $M \pm SD$ 18.1 \pm 1.04, a level corresponding to the number of breaths performed under normal conditions.

Table 2. Summary of parameters obtained with electrocardiogram and piezoelectric respiration sensors on group of 14 male unmanned aerial vehicles pilots, Military University of Technology, Warsaw, Poland, April 2025

Mission difficulty	RR [ms]			rMSSD [ms]	meanHR [bpm]	RR20 [n]	pRR20 [%]	RR50 [n]	pRR50 [%]	Power			RESP FREQ [breaths/min]	FREQ	
	minRR	maxRR	meanRR							SDRR	LF [%]	HF [%]			total [ms ² /Hz]
Low difficulty level															
1	760	1110	982	58.1	61.1	31	41.9	9	12.2	476.2	1337.4	1967	0.4	17.65	0.29
2	530	1100	1003.4	87.8	59.8	42	50.6	14	16.9	1605.2	3707	5985.1	0.4	14.81	0.25
3	530	1130	1031.2	78.3	58.2	54	43.5	13	10.5	647.6	2236.7	3246.3	0.3	16.59	0.28
4	690	1110	1023	49.5	58.7	27	44.3	4	6.6	729.2	2754.9	3588.2	0.3	16.88	0.28
5	510	1140	986.6	108.9	60.8	58	54.2	20	18.7	262.7	1484.5	1872	0.2	17.44	0.29
6	610	1120	1021	69.3	58.8	40	48.2	12	14.5	613.1	3510.9	4872	0.2	18.18	0.30
7	770	1190	1037.7	54.1	57.8	33	42.9	3	3.9	295.1	1885.9	2542.8	0.2	18.08	0.30
8	610	1150	1012	68	59.3	49	41.9	12	10.3	710.2	3023.7	4204.9	0.2	17.23	0.29
9	500	1130	972.7	98.3	61.7	98	50.3	30	15.4	1009.6	5272.6	6409.6	0.2	16.93	0.28
10	600	1130	1000.4	75.9	60	54	51.9	14	13.5	1214.3	6989.6	8319	0.2	17.98	0.30
11	660	1120	1003.8	51.7	59.8	28	41	6	8.8	496.5	3707.7	4225.4	0.1	17.55	0.29
12	630	1120	995.1	66.8	60.3	39	48.8	9	11.2	362.9	3237.1	3673.1	0.1	18.48	0.31
13	540	1090	986.2	80	60.8	23	44.2	6	11.5	1326.3	3408.5	4911.6	0.4	17.63	0.29
14	670	1120	1001.3	57.3	59.9	77	49	16	10.2	403.6	782.4	1703	0.5	16.96	0.28
total (M±SD)	615.00±84.75	1125.71±23.21	1004.03±18.46	71.71±17.15	59.79±1.09	46.64±20.09	46.62±4.13	12.00±6.80	11.73±3.80	725.18±398.44	3095.64±1565.28	4108.57±1828.84	0.26±0.12	17.31±0.87	0.29±0.01
Medium difficulty level															
1	760.00	1080.00	940.80	37.30	63.80	31.00	36.90	6.00	7.10	263.70	720.00	1059.90	0.40	18.25	0.30
2	740.00	1090.00	946.70	33.10	63.40	51.00	34.50	7.00	4.70	219.60	451.20	1332.70	0.50	18.28	0.30
3	690.00	1070.00	945.10	47.10	63.50	52.00	46.00	4.00	3.50	360.90	985.80	1470.80	0.40	19.19	0.32
4	590.00	1100.00	965.10	68.40	61.50	54.00	35.00	15.00	9.70	1714.02	2448.60	4502.40	0.70	16.51	0.28
5	530.00	1140.00	982.10	54.10	61.10	88.00	42.90	12.00	5.90	748.10	1159.20	2479.10	0.60	16.29	0.27
6	570.00	1030.00	935.40	68.40	64.10	73.00	47.70	9.00	5.90	1198.80	1174.90	2953.40	1.00	19.72	0.33

Table 2. Summary of parameters obtained with electrocardiogram and piezoelectric respiration sensors on group of 14 male unmanned aerial vehicles pilots, Military University of Technology, Warsaw, Poland, April 2025 – cont.

Mission difficulty	RR [ms]			meanHR [bpm]	rMSSD [ms]	Power					RESP FREQ [breaths/min]	FREQ			
	minRR	maxRR	meanRR			SDRR	RR20 [n]	pRR20 [%]	RR50 [n]	pRR50 [%]			LF [%]	HF [%]	total [ms ² /Hz]
Medium difficulty level – cont.															
7	490.00	1020.00	951.20	67.70	58.10	46.00	51.10	6.00	6.70	269.20	206.90	605.90	1.30	17.69	0.29
8	880.00	990.00	927.40	20.20	15.20	45.00	29.80	0.00	0.00	174.70	192.80	497.70	0.80	18.25	0.30
9	670.00	1050.00	938.50	37.30	51.00	44.00	46.80	5.00	5.30	174.70	91.10	350.00	1.90	17.39	0.29
10	590.00	1020.00	936.70	59.40	66.90	59.00	48.80	8.00	6.60	268.80	511.40	1138.40	0.50	19.85	0.33
11	630.00	1090.00	961.70	52.30	67.60	50.00	50.00	12.00	12.00	193.80	347.00	844.50	0.60	18.02	0.30
12	520.00	1090.00	973.00	69.30	75.00	50.00	41.30	10.00	8.30	1288.20	3001.70	4613.80	0.40	18.08	0.30
13	860.00	1050.00	984.10	41.30	29.70	42.00	45.70	6.00	6.50	573.40	284.90	1550.80	2.00	19.20	0.32
14	860.00	1050.00	986.20	40.00	29.30	40.00	45.50	5.00	5.70	649.30	453.50	1349.10	1.80	17.35	0.29
total (M±SD)	670.00±127.78	1062.14±38.21	955.29±19.20	49.71±15.01	55.88±21.74	51.79±13.71	43.00±6.31	7.50±3.72	6.28±2.68	578.37±474.54	859.21±838.59	1767.75±1328.60	0.92±0.57	18.15±1.04	0.30±0.02
High difficulty level															
1	880.00	1010.00	948.6	26.5	15.4	56.0	29.5	1.0	0.5	382.3	128.6	650.3	3.0	19.22	0.32
2	590.00	1010.00	809.8	49.6	66.8	80.0	37.0	24.0	11.1	872.9	785.2	1859.3	1.1	18.73	0.31
3	550.00	1020.00	843.4	45.6	68.9	88.0	49.2	16.0	8.9	1213.2	983.6	2287.6	1.2	18.43	0.31
4	700.00	1030.00	918.9	47.4	30.6	110.0	40.9	12.0	5.0	220.4	105.5	804.2	2.1	18.66	0.31
5	780.00	980.00	896.1	44.7	20.5	87.0	45.5	6.0	3.1	218.9	121.7	525.7	1.8	18.98	0.32
6	210.00	980.00	843.4	87.0	61.0	183.0	47.3	20.0	5.2	414.5	159.0	1078.1	2.6	18.98	0.32
7	230.00	1980.00	913.8	74.2	121.0	130.0	44.2	22.0	7.5	203.8	105.9	848.7	1.9	19.32	0.32
8	570.00	1030.00	812.7	50.0	70.1	86.0	44.6	26.0	13.5	330.2	315.2	776.4	1.1	18.13	0.30
9	720.00	910.00	813.4	36.4	19.4	95.0	46.3	2.0	1.0	434.4	199.1	909.1	2.2	19.15	0.32
10	660.00	890.00	776.5	33.4	30.3	70.0	34.8	10.0	5.0	304.9	98.6	1246.0	3.1	18.36	0.31
11	560.00	1040.00	927.7	43.7	55.9	64.7	28.8	7.0	5.6	554.0	159.8	961.7	3.5	19.11	0.32
12	670.00	1050.00	938.0	37.3	51.0	63.9	46.8	5.0	5.3	194.7	91.1	550.3	1.9	19.33	0.32

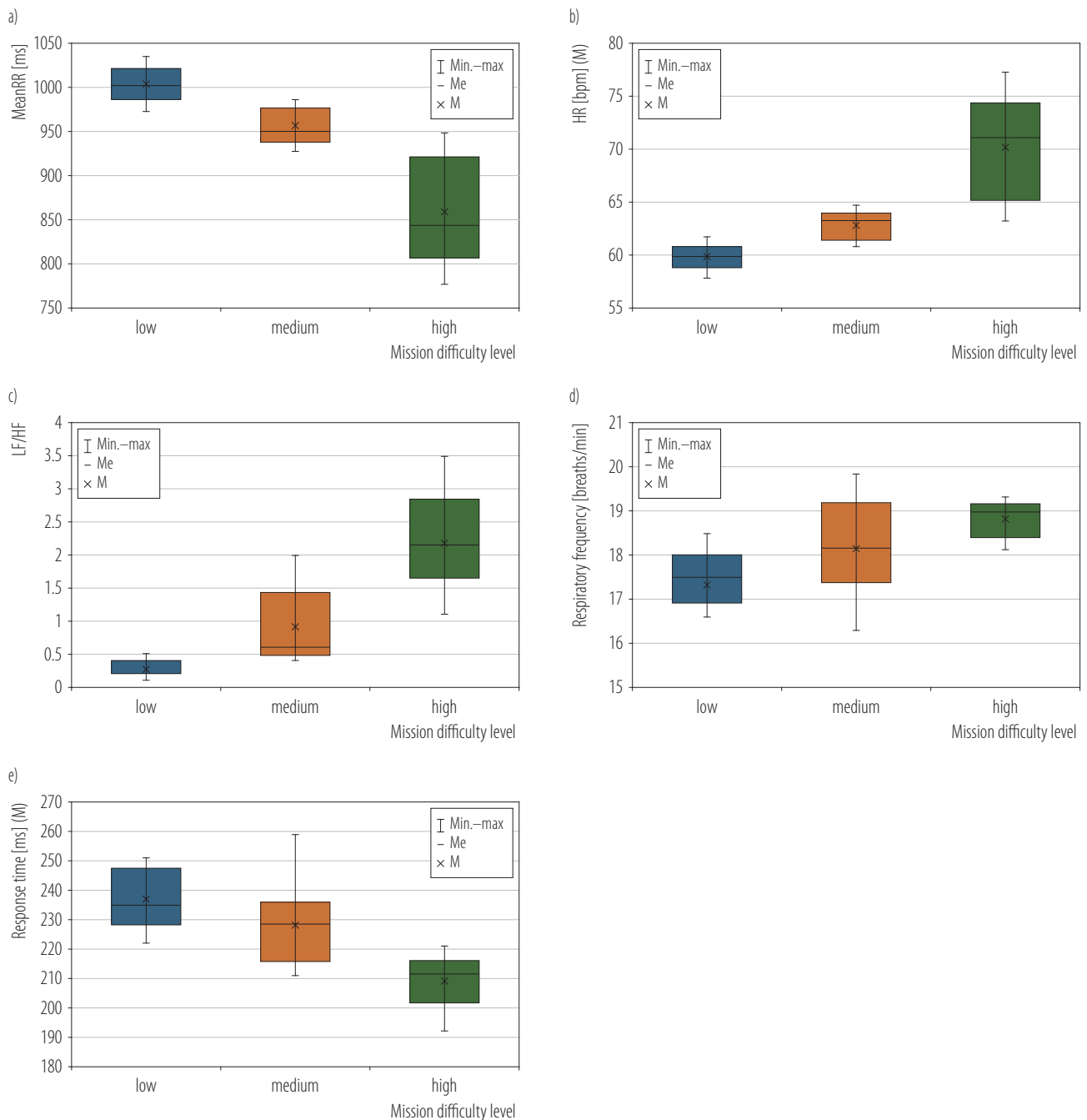


Figure 3. a) The mean RR interval (meanRR), b) heart rate (HR), c) ratio of the spectral power value in the low-frequency (LF) range to the spectral power in the high-frequency (HF) range, d) number of breaths per minute, and e) response time according to mission difficulty level in the research on group of 14 male unmanned aerial vehicles pilots (mean age 27.1 years), Military University of Technology, Warsaw, Poland, April 2025

Average response time

The subjects' visual-motor RT results ranged 192–259 ms. The RT for the low difficulty level was $M \pm SD$ 237 \pm 9.9 ms.

It is 10% slower than for the medium difficulty level ($M \pm SD$ 228.1 \pm 12.3 ms) and 15% for the high difficulty level ($M \pm SD$ 209 \pm 8.1 ms) (Figure 3e).

DISCUSSION

The heart rate increases as the mission difficulty level increases, evident in the meanRR and meanHR parameters. MeanRR decreases from 1004.03 ms at a low difficulty level of the route to 955.29 ms at a high difficulty level. It is equivalent to an increased bpm as the mission's difficulty level increased from an initial 59.8 bpm through 62.8 bpm at a medium difficulty level to 70.2 bpm for the high difficulty level of the mission.

Heart rate variability analyzed from changes in standard deviation of the RR interval (SDRR) and root mean square of successive differences (rMSSD) parameters suggests sympathetic nervous system activation as the mission difficulty level increases. At a low level of difficulty, a higher mean value of the SDRR and rMSSD parameter is noticeable (SDRR = 71.71 ms, rMSSD = 98.96 ms), suggesting good body adaptation under low-stress conditions. These parameters decrease with increasing mission difficulty and reach SDRR = 49.71 ms and rMSSD = 55.87 ms for medium and SDRR = 46.88 ms and rMSSD = 47.85 ms for high difficulty, respectively. A decrease in the parameters' values may indicate increased stress on the body or the presence of stressful stimuli.

An additional parameter analyzed during the test, which also indicates the activation of the sympathetic part of the nervous system, is the LF/HF ratio. In low-level missions, its low value is noticeable, which suggests a dominance of the parasympathetic nervous system operation. The achieved mean values of LF/HF ratio equal 0.26 are typical of relaxation conditions. An increase in the LF/HF ratio is correlated with an increase in the mission's difficulty level, reaching a maximum $M = 2.18$.

As the strain on the human body increases due to the increased difficulty level of the mission, an increase in respiratory rate is predicted. The results show that an acceleration of the respiratory rate can be observed, but it is insignificant. It may occur since all subjects were young and had a high level of physical activity. Therefore, the work of

their respiratory system may be more efficient and not affected by the tests performed.

Reaction time tests were conducted just after the subjects performed the missions. The average results showed a significantly faster reaction when the test was performed after a high-difficulty mission. The difference is 15% faster for easy missions and 10% for medium-difficulty missions. Such results may indicate the persistence of arousal of the sympathetic part of the nervous system after a completed test using the simulator. It happens because the body is exposed to stress for more complex missions and needs to maintain a higher focus.

As indicated in the relevant literature [30], effective learning is impeded under stress when the response to our actions is immediate, as is the case in the context of UAVs piloting. Furthermore, Porcelli and Degado [31] posit that "chronic stress may support a shift to habitual responding while promoting an insensitivity to novel goal-directed contingencies." In the context of aviation training, the primary objective is to optimize efficiency by ensuring that pilots are able to assimilate new flight activities with maximum ease and proficiency. Consequently, it becomes imperative to allocate a significant degree of attention to the pilot's stress levels during the training process. It has been demonstrated that it is feasible to establish a mission level that is presently low, high, or of moderate difficulty for the test subject. The automatic selection of mission difficulty levels commensurate with the activation levels of the pilot's autonomic nervous system has been posited as a means of enhancing the efficacy of simulator training.

CONCLUSIONS

In this study, the main objective was to prove the correlation between the impact of an unmanned aircraft flight simulator and the pilot's body. It has been proven through tests using ECG, PZT, and reaction time measurements that the flight simulator directly induces stress stimuli that affect the subject's body. By analyzing the individual re-

sults, it has also been proven that the sympathetic part of the nervous system is activated as the level of difficulty of the missions performed increases.

In future studies, the tests related to reaction time can be extended by performing them several times in quick succession after the mission. It allows us to understand how long the state of arousal of the sympathetic part of the nervous system persists.

Further research into the autonomic nervous system response to stimuli from a UAVs flight simulator is needed. Expanding the current study to include a more extensive study group, including people of more diverse ages, genders, and levels of experience with UAVs flight, as well as testing how much of an impact flying with FPV goggles would have, would enable a more comprehensive assessment of the sympathetic as well as parasympathetic parts of the nervous system.

The data collected and the confirmation of the impact of the UAVs flight simulation allow us to present the hypothesis that it is possible to use the data from the biosensors as mission difficulty controllers, which would result in the pilot, with each simulator exercise being trained in conditions with an optimal level of mission difficulty, adapted to his/her current skills and capabilities. Autonomous selection of the difficulty level would be feasible with artificial neural networks overseeing the training processes.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Research concept: Przemysław Wojciechowski, Konrad Wojtowicz, Jan Błaszczyk

Research methodology: Przemysław Wojciechowski, Konrad Wojtowicz, Jan Błaszczyk

Collecting material: Przemysław Wojciechowski

Statistical analysis: Przemysław Wojciechowski

Interpretation of results: Przemysław Wojciechowski, Konrad Wojtowicz, Jan Błaszczyk

References: Przemysław Wojciechowski

REFERENCES

1. Feltynowski M, editor. Systemy bezałogowych statków powietrznych w ochronie przeciwpożarowej i ratownictwie – od wyrobu do ratownika. Rozważania teoretyczne a zastosowanie w rzeczywistości. Józefów: CNBOP-PIB; 2022. <https://doi.org/10.17381/2022.1>. Polish.
2. Wojtowicz K, Wojciechowski P. Synchronous Control of a Group of Flying Robots Following a Leader UAV in an Unfamiliar Environment. *Sensors*. 2023;23(2):740. <https://doi.org/10.3390/s23020740>.
3. Landowski J. Review article Neurobiology of stress. *Neuropsych Neuropsychol*. 2007;2(1):26-36. Polish.
4. Wojciechowski P, Wojtowicz K. Simulator sickness and cybersickness as significant indicators in a primary selection of candidates for FPV drone piloting. In: 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace); 2022 Jun 27–29; Pisa, Italy. IEEE; 2022. p. 130-3. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace54187.2022.9856141>.
5. Cybulski M, Rzeźniczek P, Bilski B. Simulator sickness and the Simulator Sickness Questionnaire in Polish practice. A study involving professional drivers subject to compulsory initial and periodic qualification courses. *Med Pr Work Health Saf*. 2020;71(1):47-58. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00860>. Polish.
6. Muttray A, Breiting A, Goetze E, Schnupp T, Geissler B, Kaufmann T et al. Further development of a commercial driving simulation for research in occupational medicine. *Int J Occup Med Environ Health*. 2013;26(6):949-65. <https://doi.org/10.2478/s13382-013-0164-5>.
7. Zużewicz K, Roman-Liu D, Konarska M, Bartuzi P, Matusiak K, Korczak D et al. Heart rate variability (HRV) and muscular system activity (EMG) in cases of crash threat during simulated driving of a passenger car. *Int J Occup Med Environ Health*. 2013;26(5):710-23. <https://doi.org/10.2478/s13382-013-0148-5>.
8. Maciejewska M, Galant-Gołębiowska M. Case study of pilot's Heart Rate Variability (HRV) during flight operation.

- Transport Res Procedia. 2021;59:244-52. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.116>.
9. Wojciechowski P, Błaszczuk J. Simulator sickness in the aircraft training of military and civil pilots of various types of aircraft. *Med Pr Work Health Saf*. 2019;70(3):317-25. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00766>. Polish.
 10. Hidalgo-Muñoz AR, Béquet AJ, Astier-Juvenon M, Pépin G, Fort A, Jallais C, et al. Respiration and Heart Rate Modulation Due to Competing Cognitive Tasks While Driving. *Front Hum Neurosci*. 2019 Jan 7;12:525. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00525>.
 11. Charles RL, Nixon J. Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. *Applied Ergonomics*. 2019;74:221-32. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.028>.
 12. McCorry LK. Physiology of the autonomic nervous system. *Am J Pharm Educ*. 2007;71(4):78. <https://doi.org/10.5688/aj710478>.
 13. Weissman DG, Mendes WB. Correlation of sympathetic and parasympathetic nervous system activity during rest and acute stress tasks. *Int J Psychophysiol*. 2021;162:60-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2021.01.015>.
 14. Wehrwein EA, Orer HS, Barman SM. Overview of the Anatomy, Physiology, and Pharmacology of the Autonomic Nervous System. *Compr Physiol*. 2016 Jun 13;6(3):1239-78. <https://doi.org/10.1002/cphy.c150037>.
 15. Hafez OA, Chang RB. Regulation of Cardiac Function by the Autonomic Nervous System. *Physiology (Bethesda)*. 2025; 40(3): 258-70. <https://doi.org/10.1152/physiol.00018.2024>.
 16. Charkoudian N, Rabbitts JA. Sympathetic neural mechanisms in human cardiovascular health and disease. *Mayo Clin Proc*. 2009;Sep;84(9):822-30. <https://doi.org/10.4065/84.9.822>.
 17. Wojciechowski P, Wojtowicz K, Błaszczuk J, Marut A, Kochan J, Djabin J, et al. Evaluation of drone pilots' sympathetic and parasympathetic nervous system responses during simulated flight in familiar and unfamiliar environments. 2024 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security (TechDefense), Naples, Italy. 2024; pp.7-12, <https://doi.org/10.1109/TechDefense63521.2024.10863445>.
 18. Liftoff game [Internet]. Liftoff; 2024[cited 2024 Dec 28]. Available from: <https://www.liftoff-game.com/>.
 19. Arealme [Internet]. Czas Reakcji Test [cited 2024 Dec 28]. Available from: <https://www.arealme.com/reaction-test/pl>.
 20. PLUX Biosignals [Internet]. BITalino (r)evolution PsychoBIT; 2024 [cited 2024 Dec 27]. Available from: <https://support.pluxbiosignals.com/wp-content/uploads/2021/11/bitalino-psychobit-bundle-datasheet-revb.pdf>.
 21. PLUX Biosignals [Internet]. Electrocardiography (ECG) Sensor Data Sheet; 2024 [cited 2024 Dec 28]. Available from: <https://support.pluxbiosignals.com/wp-content/uploads/2021/11/revolution-ecg-sensor-datasheet-revb-1.pdf>.
 22. PLUX Biosignals [Internet]. ECG User Manual; 2025 [cited 2025 Jan 29]. Available from: <https://support.pluxbiosignals.com/wp-content/uploads/2021/10/biosignalsplux-Electrocardiography-ECG-User-Manual.pdf>.
 23. PLUX Biosignals [Internet]. Respiration (PZT) Sensor Data Sheet; 2025 [cited 2025 Jan 29]. Available from: <https://support.pluxbiosignals.com/wp-content/uploads/2021/11/pzt-sensor-datasheet-revb.pdf>.
 24. PLUX Biosignals [Internet]. Respiration (PZT) User Manual; 2025 [cited 2025 Jan 29]. Available from: https://support.pluxbiosignals.com/wp-content/uploads/2021/11/Respiration_PZT_User_Manual.pdf.
 25. Wojciechowski P, Wojtowicz K, Błaszczuk J. Sensory conflict in simulator sessions – measuring biosignals to predict the onset of disorderly symptoms: a brief literature review. *Int J Occup Med Environ Health*. 2024;37(5):482-94. <https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.02410>.
 26. Arquilla K, Webb AK, Anderson AP. Utility of the Full ECG Waveform for Stress Classification. *Sensors*. 2022;22:7034. <https://doi.org/10.3390/s22187034>.
 27. Pan T, Wang H, Si H, Li Y, Shang L. Identification of Pilots' Fatigue Status Based on Electrocardiogram Signals. *Sensors*. 2021;21:3003. <https://doi.org/10.3390/s21093003>.

28. Wagner RE, Plácido da Silva H, Gramann K. Validation of a Low-Cost Electrocardiography (ECG) System for Psychophysiological Research. *Sensors*. 2021;21:4485. <https://doi.org/10.3390/s21134485>.
29. PLUX Biosignals [Internet]. Respiration (PZT & RIP) Analysis Add-on; 2025 [cited 2025 Jan 29]. Available from: <https://www.pluxbiosignals.com/products/respiration-pzt-rip-analysis-add-on>.
30. Paul M, Bellebaum C, Ghio M, Suchan B, Wolf OT. Stress effects on learning and feedback-related neural activity depend on feedback delay. *Psychophysiology*. 2020; 57:e13471. <https://doi.org/10.1111/psyp.13471>.
31. Porcelli AJ, Delgado MR. Stress and Decision Making: Effects on Valuation, Learning, and Risk-taking. *Curr Opin Behav Sci*. 2017 Apr;14:33-39. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.11.015>.

6. Oświadczenia o współautorstwie.

7. Publikacja 3.



SENSORY CONFLICT IN SIMULATOR SESSIONS – MEASURING BIOSIGNALS TO PREDICT THE ONSET OF DISORDERLY SYMPTOMS: A BRIEF LITERATURE REVIEW

PRZEMYSŁAW WOJCIECHOWSKI¹, KONRAD WOJTOWICZ¹, and JAN BŁASZCZYK²

¹ Military University of Technology, Warsaw, Poland

Faculty of Mechatronics, Armament and Aerospace

² Calisia University, Kalisz, Poland

Faculty of Health Sciences

Abstract

The global virtual reality (VR) market is growing surprisingly fast. As VR applications continue to expand into various areas of life, attention is being paid to issues related to user well-being. The danger lurking for users is the occurrence of simulator sickness and artificial reality sickness, collectively referred to as sensory conflict. As early as the 1950s, an attempt was made to study simulator sickness. Unfavorable psychophysical symptoms occurred in pilots using the first flight simulators. With the development of technology, the graphic and simulation capabilities of the various types of simulators are increasing. Easier access to simulators using first person view (FPV) and thus more outstanding research capabilities allow new studies related to the incidence of this disease to compare symptoms occurring during simulator sessions with those occurring during real-world endeavors. The primary purpose of the review is to bring together the latest reports on different types of sensory conflict concerning factors that are symptomatic in prediction and diagnosis. Heart rate, brain activity, stomach activity, and skin conductance seem to be the most adequate, objective indicators of subjects' susceptibility to this phenomenon. In addition, it is intended to systematize concepts related to sensory conflict in the broadest sense. *Int J Occup Med Environ Health*. 2024;37(5):482–94

Key words:

virtual reality, flight simulator, *Simulator Sickness Questionnaire*, biosensors, simulator sickness, virtual reality sickness

INTRODUCTION

In recent years, there has been a notable surge in the utilization of virtual reality (VR) across a multitude of domains. In 2022, the market was estimated at USD 59.96 billion and is projected to grow by 27.5% annually from 2023 to 2030. In the USA alone, revenue from the VR market grew from USD 124 million in 2016 to USD 2.9 billion in 2021 [1]. As technology advanced, the influence of such developments

on the human body came to be the subject of increasing scrutiny. One of the research areas receiving particular attention is that of sensory conflict.

Sensory conflict is a phenomenon that is increasingly becoming a subject of research in medicine, psychology, engineering, and behavioral sciences. Known by various terms, e.g., simulator sickness, visually induced motion sickness, or simulator-induced sickness, this conflict

Received: March 12, 2024. Accepted: October 18, 2024.

Corresponding author: Przemysław Wojciechowski, Military University of Technology, Faculty of Mechatronics, Armament and Aerospace, gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland (e-mail: przemyslaw.wojciechowski@wat.edu.pl).

is a phenomenon in which a person experiencing a simulation, such as a flight simulator, virtual reality (VR), or computer games, manifests sickness symptoms that can be similar to those of motion sickness or migraine. However, unlike traditional motion sickness, this disease is triggered by sensations received using simulators or virtual environments rather than by the vehicle's movement.

Early examples

The first reports of related symptoms date back to the Second World War when pilots training in flight simulators began complaining of symptoms similar to motion sickness. Symptoms included nausea, dizziness, and general malaise. However, for understandable reasons, understanding or studying this phenomenon was not a priority at the time, so no attempt was made to explain the causes of pilots' malaise [2].

Development of research

Systematic research into the diagnosis began in the 1950s and 1960s when flight simulator technology began to develop, which more pilots had access to them. Pilots and training staff noticed some trainees experiencing unwanted side effects when using flight simulators. Researchers began documenting these cases and experimenting with various factors that could affect the symptoms [2].

In the 1950s, the Bell Aircraft Corporation built a helicopter simulator that had already been reported to affect pilots during demonstration tests (dizziness) negatively. In the 1970s, the development of simulators closer to those seen today can be observed, while in the 1980s, the statement of simulator sickness can already be read in the U.S. Army reports. In 1987, Jaron Lanier first used the term "virtual reality," and as early as 1995, Kay Stanney recommended the word "cybersickness" to describe the side effects caused by exposure to virtual reality [3]. Over the years, scientists have tried to distinguish between simulator sickness and cybersickness [4]. A distinction was

made between the symptoms, the duration and timing of the disease, the mechanism of each symptom, and the conditions that must be met to minimize the impact of the diseases on the subjects. Over time, the expressions "virtual reality sickness," "visually induced motion sickness," or, more generally, "sensory conflict/vestibular-visual conflict" also began to be used. Some definitions evolved from others, while subcategories were drawn from others. This review also examines the current understanding of the various terms used for the conflict.

Symptoms

Sensory conflict disorders have a variety of symptoms that are often physical. The most commonly cited symptoms are nausea, vomiting, dizziness, headaches, feelings of fatigue, sweating, numbness in the extremities, and an accelerated heartbeat [3]. These symptoms can be difficult to bear and significantly affect the comfort of simulator users. Moreover, they disrupted basic flight training by making it impossible to determine how prepared pilots were for specific missions.

Besides physical symptoms, these diseases can also lead to psychological symptoms, such as anxiety, restlessness, and spatial disorientation. Individuals experiencing this phenomenon may experience disorientation and a loss of a sense of reality, which can lead to increased stress and negatively affect the performance of the assigned task [5].

Mechanism of onset

Sensory conflict, psychological factors, response delays, sensory adaptation, tunnel effect, individual sensitivity, or degree of simulation realism – this is the most common terminology used to describe the mechanisms underlying the generation of symptoms associated with the impact of the simulator on a human being.

Simulators, virtual reality, or computer games often provide users with visual stimuli that conflict with sensory

information other senses receive, such as balance maintenance or proprioceptor signals (the sense that enables the perception of body position in space). This conflict is called visual-vestibular conflict [6,7]. Some studies suggest that psychological factors, such as individual personality traits, anxiety, stress, or negative expectations, can influence the severity of simulator sickness. Individuals who are more prone to anxiety and stress may experience more disorientation while using VR, which increases the risk of simulator symptoms sickness [7,8]. Delays between a user's movement and VR's response to that movement can affect the onset of simulator sickness. The longer the delay, the higher the risk of disorientation and loss of balance. Proper technical and hardware optimization of VR can help reduce this problem [9].

Long-term use of VR technology can affect the user's sensory adaptation to an environment of this type. After some time, the body may adapt and elicit less response to visual stimuli, which reduces the intensity of simulator sickness [10,11].

Some VR applications use a tunnel effect that limits the user's field of vision. This effect can affect feelings of disorientation and cause subjects to experience symptoms of simulator sickness [10]. Simulator sickness is not equally experienced by all simulators or VR users. Individual sensitivity to it varies; some people are more susceptible to its onset than others. This fact suggests that genetic and psychological factors may play a role in its etiology [12]. Perhaps the most crucial factor affecting the occurrence of simulator sickness is the degree of realism of the simulation. The more realistic and immersive the simulation is, the more likely the user experiences symptoms. It explains why the disease is reported more often in advanced flight simulators or VR games [13,14].

Sensory conflict is a significant phenomenon that requires an interdisciplinary approach to understand its causes and consequences. It is a problem that can be looked at from

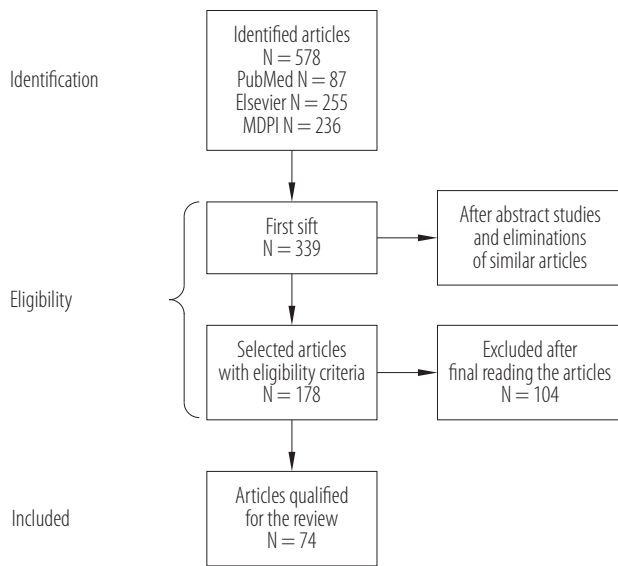
a medical and engineering point of view. It has implications for the developing technologies of simulators and virtual reality. Research on simulator sickness remains active, and the results are helping to improve simulations and make users comfortable and safe when using modern technology.

METHODS

Publications available in PubMed, Elsevier, and Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) databases were reviewed, and papers on the study of flight simulators' effects on the pilot's body were selected. Keyword combinations were "simulator," "cybersickness," "simulator sickness," "virtual reality," and "sensor conflict." Only current works were included in the analyses, limiting the years of publication to 2014–2023. Studies conducted with healthy adults without physical or mental illnesses were included. Publicly available papers in both Polish and English were analyzed. The review was conducted at the Military University of Technology, Warsaw, Poland, in December 2023. The authors excluded works where full content was unavailable, did not analyze psychophysical reactions caused by virtual reality influence, and conducted studies in groups of people with diagnosed motion sickness.

RESULTS

During the period from January 2014 to the end of September 2023, 87 papers were published in the PubMed publication database referring to systematic search with the following query: ("cybersickness" OR "simulator sickness" OR "sensor conflict") AND ("virtual reality" OR "simulator") identified in the keywords of the publication in the Elsevier database the number of articles was 255, while in the MDPI database, there were 236 articles. Content analysis of the abstracts or full texts made it possible to identify 74 papers meeting the criteria (Figure 1).



MDPI – Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

Figure 1. Study selection process for the review on measuring biosignals for the prevention of sensor conflict in simulator sessions in 2014–2023

Current understanding of basic definitions

Cybersickness

Cybersickness is a set of symptoms resulting from excessive use of electronic devices such as computers, televisions, and smartphones (Figure 2). Researchers at Coventry University have dubbed the phenomenon a “cybersickness.” Symptoms are similar to motion sickness and can include nausea, headaches, and other discomforts, often occurring during rapid or prolonged scrolling of content displayed on mobile devices. Other symptoms can include dizziness, fatigue, trouble concentrating, and the post-exposure period, contributing to sleep disturbances. The duration of cybersickness symptoms can vary depending on the subjects’ predispositions and the intensity of screen exposure [15–18].

Simulator sickness

Simulator sickness is one of a subset of visual-vestibular conflict disorders (Figure 2). Respondents typically experience it from a first-person perspective when playing video games. It was discovered in the context of airplane pilots, who exten-

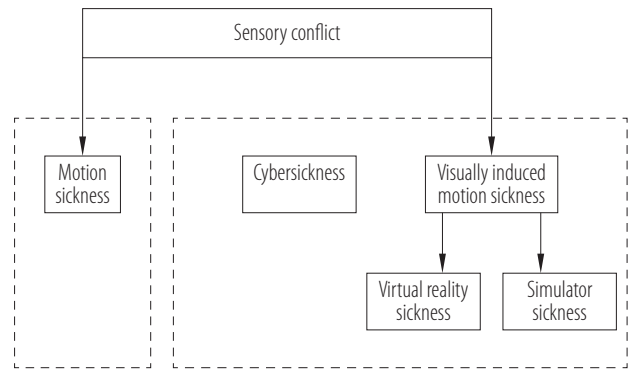


Figure 2. Classification of sickness types according to the mechanism of occurrence

sively use flight simulators during training. Although the exact date of discovery is not available, it is known that research on a similar phenomenon, known as simulator sickness, was conducted as early as 1958 [2,3]. It is, in many ways, similar to motion sickness but occurs in simulated environments and can be induced without actual movement [19].

Symptoms of simulator sickness include discomfort, apathy, drowsiness, confusion, fatigue, and nausea. These symptoms negatively affect the effectiveness of simulator training in flight training and can consequently lead to its reduction for some pilots. What is more, pilots who have experienced simulator sickness are less likely to use simulators, which can affect their level of training, increasing their reaction time in emergencies, for example [20]. The duration of symptoms of simulator sickness can vary depending on the person and the intensity of exposure to the simulator. For those who suffered from severe symptoms (total *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) score of >60), recovery time was >30 min. On the other hand, for those who experienced only mild symptoms (total SSQ score of ≤25), it took ≤5 min to recover from the symptoms of the simulator sickness [21–25].

Virtual reality sickness

Virtual reality sickness occurs when exposure to a virtual environment causes symptoms similar to motion sickness.

It is a particular form of simulator sickness directly related to the use of VR (Figure 2). The most common symptoms include general discomfort, eye strain, headache, increased stomach activity, nausea, vomiting, pallor, sweating, fatigue, drowsiness, confusion, and apathy [26–28]. The disease was first observed as early as the 1960s and 1970s when the first users of VR goggles spent too much time in virtual reality. However, it was only after the release of the Oculus Rift DK goggles (Oculus, Irvine, California, USA), when mostly new users of VR technology complained of dizziness and nausea after just a few minutes spent in the VR world, that the disease began to be taken seriously [29].

The duration of virtual reality sickness symptoms can vary depending on the person and the intensity of exposure to the virtual environment. One study found that over half of people playing a virtual reality game using a set of Oculus Rift goggles felt sick in as little as 15 min. Another study, which assessed the relationship between exposure time and the severity of virtual reality sickness symptoms during a 7.5-hour virtual immersion, found that the severity of virtual reality sickness symptoms was positively correlated with exposure time: the longer participants were exposed to the VR environment, the more severe the sickness symptoms they felt [18,29–31].

Visually induced motion sickness

Visually induced motion sickness (VIMS) is a phenomenon similar to traditional motion sickness that is often observed in users of technologies that use all types of visualization of spatial situations, such as simulators or virtual reality goggles. It occurs when physically immobile individuals observe a convincing vision of movement (Figure 2). It can also occur when there are detectable delays between head movements and the conversion and presentation of the projected image in head-mounted displays [32].

Symptoms of VIMS can include nausea, vomiting, increased stomach activity, sweating and facial pallor (some-

times referred to as “cold sweats”), salivation, increased sweating, dizziness, drowsiness (also referred to as “sopite syndrome”), sometimes headache, loss of appetite and increased sensitivity to odors [33,34].

Basic biosensors

to verify the presence of simulator sickness

Heart rate

The primary method of measuring heart rate is electrocardiography (ECG) (Figure 2). There is no clear answer to how virtual reality affects heart rate. Studies [26,35–37] suggest that heart rate can increase or decrease. Other, more consistent results were obtained by Garcia-Agundez et al. [38,39]. They found that heart rate decreases in people exposed to simulator or VR sickness.

Moreover, some works present a completely different position, according to which the heart rate increases with exposure to simulator sickness [40,41]. Further, one can find a study [42] denying the existence of any relationship between heart rate and the occurrence of simulator sickness. It should be noted that the main factor influencing the change in heart rate is stress caused by external stimuli, which has been confirmed in works such as [43,44]. Therefore, it is necessary to investigate whether these changes are related to possible stress related to the content displayed on the screen or in the simulator goggles rather than the sensations of using virtual reality.

Bioelectrical activity of the brain

Before interpreting electroencephalography (EEG) data, one must know which brain parts are involved in receiving and analyzing visual information, movement, and balance [45] (Figure 3). In addition, it is necessary to consider whether areas responsible for controlling the digestive system can provide clues about potential susceptibility to simulator sickness. According to a recent study [46], the visual-prefrontal network in the medial cortex consists of the visual cingulate sulcus (CSv), prefrontal motor (PcM),

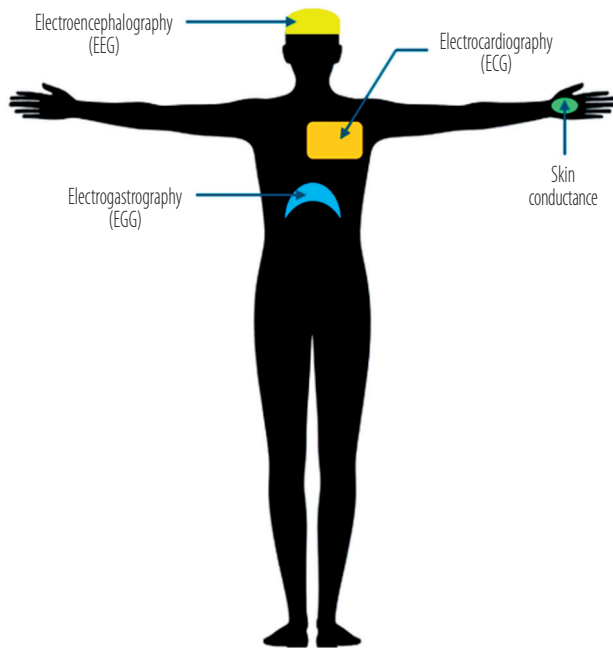


Figure 3. Placement of biosensors used to predict the occurrence of sensory conflict in simulator sessions

and V6 complex. The V6 complex is a motion-sensitive area that mainly represents the peripheral visual field, and its cells are susceptible to translational motion [47]. The study also found that 2 additional brain areas adjacent to the corpus callosum show similarities in location and response to vestibular and visual stimuli with self-motion-related brain areas recently described in primates. The vestibular pericallosal sulcus (vPCS) processes vestibular information, while the motion-sensitive region in the retrosplenial complex (mRSC) is associated with the activation of (radial) visual motion information [48,49].

One of the fundamental theories describing the basis of simulator sickness is the sensory conflict [50], arising when comparing visual and vestibular signals in the cerebral cortex. By recording and using EEG, electrical impulses, and brain waves, individual signals can be separated and assigned to different groups. According to the study [51], observed frequencies are mainly categorized into 4 groups:

- delta (0.5–4 Hz),
- theta (4–8 Hz),

- alpha (8–13 Hz),
- beta (13–30 Hz).

However, according to the literature, an additional gamma group [52] and even a “mu rhythm” group [53] are identified.

As a result of changes in the power of signals from different frequency bands, some changes in the activity of individual brain areas of the study participants can be distinguished. The energy ratios of the gamma band are related to the level of simulator sickness [54,55]. In 2016, Wibirama and Hamamoto [55] clearly stated that beta and theta frequencies are the best for detecting simulator sickness. An additional method used for diagnostic purposes is the analysis of event-related potentials (ERPs), which measure brain activity during a potential event that may cause simulator sickness [56,57].

Stomach activity

Electrogastrography (EGG) is a non-invasive method for measuring gastric myoelectrical activity (Figure 3). It is a promising method for measuring gastric myoelectrical activity by placing epidermal electrodes on the abdomen in the gastric region [58]. Changes in muscle tone, and consequently changes in gastric activity, can indicate an autonomic nervous system response triggered by an external stimulus. In 2016, Dennison et al. [33] found that tachygastric frequency increases with cybersickness while gastric bradygastric activity decreases. One of the main shortcomings of the study was insufficient exposure time to the VR environment because the frequency of EGG measurements was only 3 cycles/min.

Potential indicators from the EGG signal are not limited to changes in the ratio of gastric frequencies. In 2021, there was a study that showed that an increase in dominant frequency (DF), percentage of power spectrum density crest factor (CF), and decrease in high power spectral density (PSD) are closely related to cybersickness [59]. It should be underlined that the increase in EGG amplitude occurred simultaneously with the reported nausea. This study lasted 45 min and

was divided into 3 equal parts, in which the subjects watched recordings of 3 driving simulations with different route profiles and varying degrees of maneuverability. Electrogastrography is still not widely used. More studies are required to accurately determine the correlation of the signal from the EGG system electrodes and simulator sickness/VR sickness. Brain-gut interaction is undoubtedly an exciting direction for developing research on VR and simulator sickness [60,61].

Skin conductance

Various studies often mention the skin conductance (SC) (Figure 3) level or galvanic skin response (GSR). Unfortunately, the available results are ambiguous [15,20,42,50,62]. Some studies have shown a significant relationship between the level of skin conductance and simulator sickness [42], while others have noticed an increase in skin conductance but attributed it mainly to increased arousal, not to cybersickness [63]. The correlation between the level of skin conductance and the occurrence of simulator sickness should be noticeable and easy to examine. Unfortunately, it should be remembered that GSR is nothing more than a measurement of the change in electrical resistance of the skin. It depends on the degree of skin moisture caused by sweating, which the sympathetic system controls. However, it is a challenge to link directly the nature of the change in skin conductance with a specific trigger causing simulator sickness.

Verification based on the subjective feelings of respondents

It is important to note that the results obtained from biosensors in the tests may not always be the most reliable indicator of disease susceptibility. In addition, the subjective assessment of the subjects' psychophysical state and their feelings about the comfort of the simulators should also be considered [64]. Currently, the most common questionnaires used to assess the psychophysical state of respondents are:

- *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ),
- *Motion Sickness Assessment Questionnaire* (MSAQ),
- *Cybersickness Questionnaire* (CSQ),

- *Visually Induced Motion Sickness Susceptibility Questionnaire* (VIMSSQ, also known as the VIMSSQ-short).

Simulator Sickness Questionnaire is a tool for assessing simulator sickness. It is used in post-exposure studies where symptoms such as nausea, confusion, and oculomotor disturbances are assessed. The SSQ is used in tests conducted on training simulators of all types of vehicles and aircraft. The SSQ is well received by test subjects, who rate it as not requiring much time and easy to understand [65–68].

Motion Sickness Assessment Questionnaire is a motion sickness assessment tool. It is used to assess responses to various aspects of motion sickness induced by VR. The MSAQ is a crucial tool for assessing motion sickness and is used in studies that evaluate the effects of motion sickness on sleep quality and task performance ratings [66,67].

Cybersickness Questionnaire is a tool for assessing digital illness, a side effect of virtual reality (VR) technology. The CSQ allows the assessment of cybersickness digital disease during VR exposure and uses the pupil size test, a biomarker of cybersickness digital disease. The CSQ has significantly better internal consistency than the SSQ and VRSQ, and CSQ scores have significantly better psychometric properties in detecting temporary performance decline caused by digital illness [69–73].

Visually Induced Motion Sickness Susceptibility Questionnaire is a tool for assessing visually induced motion sickness. It is used to assess individual susceptibility to visually induced motion sickness. The VIMSSQ has good psychometric properties and is a valuable addition to the MSAQ in predicting visually induced motion sickness [74].

CONCLUSIONS

Critically analyzing the results of various studies related to simulator sickness and VR sickness, it is evident that while there are established tools and questionnaires for assessing and quantifying these phenomena, more comprehensive research is needed to understand the exact nature and underlying causes of simulator sickness. Additionally, the

impact of simulator sickness on a wide range of users, including those with different levels of experience with virtual reality, needs to be further explored.

The existing questionnaires and assessment tools provide valuable insights into the symptoms and manifestations of simulator sickness. However, standardized protocols and procedures for conducting susceptibility tests are needed to ensure consistency and reliability across different studies. It facilitates more accurate comparisons of results and enhances the generalizability of findings.

Furthermore, including physiological measures such as ECG, EEG, and GSR examinations, in addition to subjective questionnaires, can provide a more comprehensive understanding of the psychophysical responses to virtual environments. This multidimensional approach can help identify individual differences in susceptibility to simulator sickness and contribute to developing targeted interventions and preventive measures. For instance, ECG can provide insights into heart rate variability, EEG can indicate changes in brain activity, and GSR can measure changes in skin conductance, all of which can be correlated with subjective reports of discomfort or sickness.

It is also essential to consider the potential impact of task complexity, exposure duration, and the nature of the virtual environment (e.g., whether it is a game, a training simulation, or a therapeutic environment) on the onset and severity of simulator sickness. Understanding these contextual influences can aid in designing VR experiences that minimize the risk of simulator sickness while optimizing user engagement and performance.

Moreover, the long-term effects of repeated exposure to virtual environments on susceptibility to simulator sickness need to be explored. It is particularly relevant in VR-based training and rehabilitation programs, where individuals may be exposed to virtual environments for extended periods. Longitudinal studies can provide valuable insights into the adaptive mechanisms of the human body, such as habituation or desensitization, and potential

habituation effects over time, which can help inform the development of safer and more effective VR experiences. In conclusion, while existing research has shed light on the symptoms and correlates of simulator sickness, there is a pressing need for further investigations that delve into the underlying mechanisms, individual differences, and contextual factors associated with this phenomenon. By addressing these gaps in knowledge, researchers can contribute to developing safer and more effective virtual reality experiences for diverse user populations. Despite the large number of articles on the topic of simulator sickness and VR sickness, there is a legitimate need for increased work on the exact nature of this phenomenon and the qualifications of those immune to its impact. Given the high interest in using virtual reality in both entertainment and training and the low level of knowledge related to simulator disease among users, it seems necessary to conduct training that plays both an informative and preventive role. However, with the potential for advancements in virtual reality technology, it is possible to look forward to the future where these issues are better understood and effectively addressed.

From an analysis of various studies of the problem related to sensory conflict, it can be noted that all the psychophysical symptoms studied in connection with simulator sickness, VR sickness, or cybersickness are directly related to those indicating the presence of stress in the broadest sense. It is essential to consider whether the stress occurring in the subjects is related to the fear of failure to perform a given task or the process of the test being conducted. It seems that an indispensable element in correctly performed research related to susceptibility to simulator sickness is the psychophysical verification of the test subject before and after the tests (ECG, EEG, GSR examination) have conducted an in-depth analysis of the topic of simulator sickness and VR sickness. There is a legitimate need for increased research on the exact nature of this phenomenon and the qualifications of those immune to its impact. The interest in using virtual reality in entertainment and training is high, yet us-

ers need more knowledge of simulator sickness. Therefore, it seems necessary to conduct training that plays both an informative and preventive role.

An analysis of various studies related to sensory conflict shows that all the psychophysical symptoms studied in connection with simulator sickness/VR or cybersickness are directly related to those indicating the presence of stress in the broadest sense. It is essential to consider whether the stress occurring in the subjects is related to the fear of failure to perform a given task or the process of the test being conducted. Prolonged exposure to the test causes fatigue and increases the subject's stress level, leading to ambiguity in the results. Therefore, a shorter but more complex, structured exposure to a light stimulus (moving image) may prove more accurate in assessing susceptibility to sensory conflict disease. In critically analyzing the results of various studies related to simulator sickness and VR sickness, it is evident that while there are established tools and questionnaires for assessing and quantifying these phenomena, more comprehensive research is needed to understand the exact nature and underlying causes of simulator sickness. Additionally, the impact of simulator sickness on a wide range of users, including those with different levels of experience and susceptibility, should be further explored.

Furthermore, developing standardized protocols for simulator sickness susceptibility tests is crucial to ensure consistency and comparability across different studies. It helps establish reliable benchmarks for assessing and comparing individuals' susceptibility to simulator sickness.

It is also important to consider the practical implications of simulator sickness, especially when using VR for training and entertainment. Understanding the factors contributing to simulator sickness and developing effective preventive measures is crucial in maximizing VR technology's potential while minimizing its adverse effects on users.

It seems reasonable to analyze the use of electromyography (EMG) to verify muscle fatigue and, on this basis, determine the optimal duration of the test [75]. The prolonged ex-

posure to the test causes fatigue and affects the subject with an increase in stress level, which, as a result, can lead to ambiguity in the results. A shorter but more complex, structured exposure to a light stimulus (moving image) may prove more accurate in assessing susceptibility to virtual reality sickness.

Author contributions

Research concept: Przemysław Wojciechowski,

Konrad Wojtowicz, Jan Błaszczuk

Research methodology: Przemysław Wojciechowski,

Konrad Wojtowicz, Jan Błaszczuk

Collecting material: Przemysław Wojciechowski

Statistical analysis: Przemysław Wojciechowski

Interpretation of results: Przemysław Wojciechowski,

Jan Błaszczuk

References: Przemysław Wojciechowski, Konrad Wojtowicz

REFERENCES

1. Statista [Internet]. 2022 [cited 2023 Dec 30]. Alsoop T. US VR revenue by segment 2016–2021. Available from: <https://www.statista.com/statistics/745626/virtual-reality-revenue-by-segment-us/>.
2. Kennedy RS, Hettinger LJ, Lilienthal MG. Simulator sickness. In: Crampton GH, editor. *Motion and Space Sickness*. Boca Raton: CRC Press; 1988. p. 317–341.
3. Wojciechowski P, Błaszczuk J. Simulator sickness in the aircraft training of military and civil pilots of various types of aircraft. *Med Pr Work Health Saf*. 2019;70(3):317–325. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00766>.
4. Wojciechowski P, Wojtowicz K. Simulator sickness and cybersickness as significant indicators in a primary selection of candidates for FPV drone piloting. In: 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace); 2022 Jun 27–29; Pisa, Italy. IEEE; 2022. p. 130–133. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace54187.2022.9856141>.
5. Bałaj B, Lewkowicz R, Francuz P, Augustynowicz P, Fudali-Czyż A, Stróżak P, et al. Spatial disorientation cue effects on gaze behaviour in pilots and non-pilots. *Cogn Tech Work*. 2019; 21:473–486. <https://doi.org/10.1007/s10111-018-0534-7>.

6. Oman CM. Sensory conflict in motion sickness: an observer theory approach. *Pictorial communication in virtual and real environments*, 1991;362–376.
7. Kim J, Kim W, Ahn S, Kim J, Lee S. Virtual Reality Sickness Predictor: Analysis of visual-vestibular conflict and VR contents. In: 2018 Tenth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX); 2018; Cagliari, Italy. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/QoMEX.2018.8463413>.
8. Lawson BD, Castelnero H. Motion sickness symptomatology and origins. In: Hale KS, Stanney KM, editors. *Handbook of virtual environments*. Boca Raton: CRC Press; 2016. p. 47–82.
9. Qamar S, Anwar Z, Afzal M. A systematic threat analysis and defense strategies for the metaverse and extended reality systems. *Comput Secur.* 2023;128:103127. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103127>.
10. Stanney KM, Kennedy RS, Drexler JM. Cybersickness is not simulator sickness. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet.* 1997;41(18): 1132–1136.
11. Keshavarz B, Riecke BE, Hettinger LJ, Campos JL. Vection and visually induced motion sickness: how are they related? *Front Psychol.* 2015;6:472. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00472>.
12. Grassini S, Laumann K, Luzi AK. Association of Individual Factors with Simulator Sickness and Sense of Presence in Virtual Reality Mediated by Head-Mounted Displays (HMDs). *Multimodal Technol Interact.* 2021;5(3):7. <https://doi.org/10.3390/mti5030007>.
13. Chardonnet JR, Mirzaei MA, Mérienne F. Features of the Postural Sway Signal as Indicators to Estimate and Predict Visually Induced Motion Sickness in Virtual Reality. *Int J Hum Comput Interact.* 2017;33:771–785.
14. Rebenitsch L, Owen CB. Review on cybersickness in applications and visual displays. *Virtual Real.* 2016;20:101–125.
15. Jung S, Li R, McKee R, Whitton MC, Lindeman RW. Floor-vibration VR: mitigating cybersickness using whole-body tactile stimuli in highly realistic vehicle driving experiences. *IEEE Trans Vis Comput Graph.* 2021;27(5):2669–2680. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3067773>.
16. Tian N, Lopes P, Boulic R. A review of cybersickness in head-mounted displays: raising attention to individual susceptibility. *Virtual Reality* 26, 2022;1409–1441. <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00638-2>.
17. Martirosov S, Bureš M, Zítka T. Cyber sickness in low-immersive, semi-immersive, and fully immersive virtual reality. *Virtual Real.* 2022;26:15–32. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00507-4>.
18. Martirosov S, Kopecek P. Cyber sickness in virtual reality – literature review. In: *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*; 2017 Nov 08–11; Zadar, Croatia. Vienna, Austria: DAAM International; 2017. p. 0718–0726.
19. Wienrich C, Weidner CK, Schatto C, Obrenski D, Israel JH. A virtual nose as a rest-frame – the impact on simulator sickness and game experience. In: 2018 10th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-games); 2018 Sep 5–7; Würzburg, Germany. p. 1–8. <https://doi.org/10.1109/VS-Games.2018.8493408>.
20. Keshavarz B, Ramkhalawansingh R, Haycock B, Shahab S, Campos JL. Comparing simulator sickness in younger and older adults during simulated driving under different multisensory conditions. *Transp Res Part F.* 2018;54:47–62. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.01.007>.
21. Katsigiannis S, Willis R, Ramzan NA. QoE and simulator sickness evaluation of a smart-exercise-bike virtual reality system via user feedback and physiological signals. *IEEE Trans Consum.Electron.* 2019;65(1):119–127.
22. Wojciechowski P, Wojtowicz K, Błaszczuk J. AI-driven method for UAV Pilot Training Process Optimization in a Virtual Environment. In: 2023 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security (TechDefense); 2023 Nov 20–23; Rome, Italy. p. 240–244. <https://doi.org/10.1109/techdefense59795.2023.10380871>
23. de Winkel KN, Talsma TMW, Happee R. A meta-analysis of simulator sickness as a function of simulator fidelity. *Exp Brain Res.* 2022;240:3089–3105. <https://doi.org/10.1007/s0021-022-06485-6>.

24. Polak E, Slugaj R, Gardzinska A. 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>.
25. Serge S R, Moss J D. Simulator sickness and the oculus rift: a first look. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*. 2015; 59:761–765. <https://doi.org/10.1177/1541931215591236>.
26. Rockstroh C, Blum J, Göritz AS. Virtual reality in the application of heart rate variability biofeedback. *Int J Hum Comp Stud*. 2019;130:209-220.
27. Ajoy F, Steven F. Combating VR Sickness through Subtle Dynamic Field-Of-View Modification. In: 2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI); 2016 Mar 19–20; Greenville, SC, USA. IEEE; 2016. p. 201-210. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2016.7460053>.
28. Weidner F, Hoesch A, Poeschl S, Broll W. Comparing VR and non-VR driving simulations: an experimental user study. In: 2017 IEEE Virtual Reality (VR); 2017 Mar 18–22; Los Angeles, CA, USA. IEEE; 2017. p. 281–282 <https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892286>.
29. Saredakis D, Szpak A, Birckhead B, Keage HAD, Rizzo A, Loetscher T. Factors Associated with Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Hum Neurosci*. 2020 Mar 31;14:96. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00096>.
30. Choi SS, Jung, K, Noh SD. Virtual reality applications in manufacturing industries: past research, present findings, and future directions. *Concurr Eng-Res Appl*. 2015;23(1):40–63.
31. Jin W, Fan J, Gromala D, Pasquier P. Automatic prediction of cybersickness for virtual reality games. In: 2018 IEEE games, entertainment, media conference (GEM); 2018 Aug 15–17; Galway, Ireland. p 1–9. <https://doi.org/10.1109/GEM.2018.8516469>.
32. Naoki K, Hiroki Y, Masahiro I, Yutetsu M. Effects of Visual Induced Motion Sickness of Stereoscopic 3D Interactive Video. In: IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE); 2015 Oct 27–30; Osaka, Japan. p. 664–665. <https://doi.org/10.1109/GCCE.2015.7398678>.
33. Dennison MS, Wisti AZ, D’Zmura M. Use of physiological signals to predict cybersickness. *Displays*. 2016;44:42–52. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2016.07.002>.
34. Sawada Y, Itaguchi Y, Hayashi M, Aigo K, Miyagi T, Miki M, et al. Effects of synchronized engine sound and vibration presentation on visually induced motion sickness. *SciRep* 2020; 10(1):1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64302-y>.
35. Wibirama S, Hamamoto K. Investigation of visually induced motion sickness in dynamic 3D contents based on subjective judgment, heart rate variability, and depth gaze behavior, In: 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society; 2014 Aug 26–30; Chicago IL, USA. Chicago: IEEE; 2014. p. 4803–4806. <https://doi.org/10.1109/embc.2014.6944698>.
36. Wibirama S, Nugroho HA, Hamamoto K. Depth gaze and ECG based frequency dynamics during motion sickness in stereoscopic 3D movie, *Entertain Comput*. 2018;26:117–127. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2018.02.003>.
37. Wijasena HZ, Ferdiana R, Wibirama SA. Survey of Emotion Recognition using Physiological Signal in Wearable Devices. In: 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Mechatronics Systems (AIMS); 2021 Apr 28–30; Bandung, Indonesia. Piscataway: IEEE; 2021. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/AIMS52415.2021.9466092>.
38. Garcia-Agundez A, Reuter C, Becker H, Konrad R, Caserman P, Miede A, et al. Development of a classifier to determine factors causing cybersickness in virtual reality environments. *Games Health J*. 2019;8(6):439–444.
39. Garcia-Agundez A, Reuter C, Caserman P, Konrad R, Göbel S. Identifying cybersickness through heart rate variability alterations. *Int J Virtual Real* 2019;19(1):1–10.
40. Gavvani AM, Hodgson DM, Nalivaiko E. Effects of visual flow direction on signs and symptoms of cybersickness. *PloS One* 2017;12(8):e0182790. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182790>.
41. Gavvani AM, Nesbitt KV, Blackmore KL, Nalivaiko E. Profiling subjective symptoms and autonomic changes associated with cybersickness. *Auton Neurosci*. 2017;203:41–50.

42. Guna J, Geršak G, Humar I, Song J, Drnovšek J, Pogačnik M. Influence of video content type on users' virtual reality sickness perception and physiological response. *Futur Gener Comput Syst.* 2019;91:263–276.
43. Gevirtz R. The Promise of Heart Rate Variability Biofeedback: Evidence-Based Applications. *Biofeedback.* 2013;41(3):110–120. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-41.3.01>.
44. Järvelin-Pasanen S, Sinikallio S, Tarvainen MP. Heart rate variability and occupational stress – systematic review. *Ind Health.* 2018;56(6):500–511.
45. Abreu M, Carmo AS, Peralta AR, Sá F, da Silva H, Bentes C, et al. PreEpiSeizures: description and outcomes of physiological data acquisition using wearable devices during video – EEG monitoring in people with epilepsy. *Front Physiol.* 2023;14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1248899>.
46. Beer AL, Becker M, Frank SM, Greenlee MW. Vestibular and visual brain areas in the medial cortex of the human brain. *J Neurophysiol.* 2023;129(4):948–962. <https://doi.org/10.1152/jn.00431.2022>.
47. Pitzalis S, Fattori P, Galletti C. The functional role of the medial motion area V6. *Front Behav Neurosci.* 2013;6:91. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2012.00091>.
48. Badakva AM, Miller NV, Zobova LN. Integration of Vestibular, Visual, and Proprioceptive Inputs in the Cerebral Cortex during Movement Control. *Hum Physiol* 2023;49:176–182. <https://doi.org/10.1134/S0362119722600515>.
49. Li P, Jiang W, Su F. Single-channel EEG-based mental fatigue detection based on deep belief network. In: 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC); 2016 Aug 16–20; Orlando, FL, USA. IEEE; 2016. p. 367–370. <https://doi.org/10.1109/embc.2016.7590716>.
50. Terenzi L, Zaal P. Rotational and translational velocity and acceleration thresholds for the onset of cybersickness in virtual reality. In: AIAA Scitech 2020 Forum; 2020 Jan 6–10; Orlando, Florida; USA. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0171>.
51. Arafat IM, Ferdous SM, Quarles J. Cybersickness-provoking virtual reality alters brain signals of persons with multiple sclerosis. In: 2018 IEEE conference on virtual reality and 3D user interfaces (VR); 2018 Mar 18 -22; Reutlingen, Germany. p. 1–120.
52. Dabbabi T, Bouafif L, Cherif A. A Review of Non Invasive Methods of Brain Activity Measurements via EEG Signals Analysis. In: 2023 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET); 2023 Apr 29 – May 1; Hammamet, Tunisia. https://doi.org/10.1109/IC_ASET58101.2023.10150607.
53. Azizi M, Azimi L, Heysiattalab S, Aamidfar M. Changes of the brain's bioelectrical activity in cognition, consciousness, and some mental disorders. *Med J Islam Repub Iran.* 2017 Sep 3;31:53. <https://doi.org/10.14196/mjiri.31.53>.
54. Lim HK, Ji K, Woo YS, Han D-U, Lee D-H, Nam SG, et al. Test-retest reliability of the virtual reality sickness evaluation using electroencephalography (EEG). *Neurosci Lett* 2021;743: 135589. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2020.135589>.
55. Khaitami, Wibawa AD, Mardi S, Nugroho S, Khoirunnisaa AZ. EEG visualization for cybersickness detection during playing 3D video games. In: 2019 International Seminar On Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA); 2019 Aug 28–29; Surabaya, Indonesia. p. 325–330.
56. Naqvi SAA, Badruddin N, Jatoi, MA, Malik AS, Hazabbah W, Abdullah B. EEG based time and frequency dynamics analysis of visually induced motion sickness (VIMS). *Australas Phys Eng Sci Med.* 2015;38:721–729. <https://doi.org/10.1007/s13246-015-0379-9>.
57. Ko LW, Lee HC, Tsai SF, Lin CT, Shih TC, Chuang YT, et al. EEG-based motion sickness classification system with genetic feature selection. In: 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence, Cognitive Algorithms, Mind, and Brain (CCMB); 2013 Apr 16 -19; Singapore. p. 158–164. <https://doi.org/10.1109/CCMB.2013.6609180>.
58. Kim YY, Kim HJ, Kim EN, Ko HD, Kim HT. Characteristic changes in the physiological components of cybersickness. *Psychophysiol.* 2005;42(5):616–625.
59. Gruden T, Popović NB, Stojmenova K, Jakus G, Miljković N, Tomažič S, et al. Electrogastrigraphy in Autonomous Vehicles – An Objective Method for Assessment of Motion

- Sickness in Simulated Driving Environments. *Sensors*. 2021; 21:550 <https://doi.org/10.3390/s21020550>.
60. Guo X, Wang Z, He F, Qi H, Chen L, Li C, et al. A High-Precision, Low-Cost, Wireless, Multi-Channel Electrogastrography System. In: 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). 2021 Nov 1–5; Virtual Conference. p. 6779–6782. <https://doi.org/10.1109/embc46164.2021.9629576>.
61. Koch KL. Gastric dysrhythmias: a potential objective measure of nausea. *Exp Brain Res*. 2014;232(8):2553–2561.
62. Banganho A, Santos M, da Silva H. Electrodermal activity: Fundamental principles, measurement, and application. *IEEE Potentials*. 2022;41(5):35–43. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2020.2983381>.
63. Dennison MS, Wisti AZ, D’Zmura M. Use of physiological signals to predict cybersickness. *Displays*. 2016;44:42–52.
64. Golding JF, Rafiq A, Keshavarz B. Predicting Individual Susceptibility to Visually Induced Motion Sickness by Questionnaire. *Front Virtual Real*. 2021;2:576871. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.576871>.
65. Cybulski M, Rzeźniczek P, Bilski B. Choroba symulatorowa i Simulator Sickness Questionnaire w polskiej praktyce. Badania kierowców zawodowych podlegających obowiązkowym kursom kwalifikacji wstępnej i okresowej. *Med Pr Work Health Saf*. 2020;71(1):47–58. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00860>. Polish.
66. Alnagrat A, Shagluf A, Sulieman R, Akeel A, Ismail RC, Syed I, et al. Assessing Virtual Reality Sickness in Highly Immersive Virtual Laboratory Environments: Simulator Sickness Questionnaire and Mitigation Strategies. In: 2023 IEEE 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA); 2023 May 21–23; Benghazi, Libya. p. 376–381. <https://doi.org/10.1109/MISTA57575.2023.10169158>.
67. Chattha UA, Janjua UI, Anwar F, Madni TM, Cheema MF, Janjua SI. Motion Sickness in Virtual Reality: An Empirical Evaluation. *IEEE Access*. 2020;8:130486–130499. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007076>.
68. Biernacki MP, Kennedy RS, Dziuda L. Zjawisko choroby symulatorowej oraz jej pomiar na przykładzie kwestionariusza do badania choroby symulatorowej – SSQ. *Med Pr Work Health Saf*. 2016;67(4):545–555. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00512>. Polish.
69. Lewkowicz R, Bałaj B, Francuz P. The incidence of simulator sickness in pilots and non-pilots exposed to spatial disorientation events in the gyro-ipt simulator. *Pol J Aviat Med Bioeng Psychol*. 2020;26(4):13–25. <https://doi.org/10.13174/pjampb.17.05.2023.02>.
70. Oh H, Son W. Cybersickness and Its Severity Arising from Virtual Reality Content: A Comprehensive Study. *Sensors*. 2022;22:1314. <https://doi.org/10.3390/s22041314>
71. Caserman P, Garcia-Agundez A, Gámez Zerban A, Göbel S. Cybersickness in current-generation virtual reality head-mounted displays: systematic review and outlook. *Virt Real*. 2021;25:1153–1170. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00513-6>.
72. Kourtesis P, Linnell J, Amir R, Argelaguet F, MacPherson SE. Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire (CSQ-VR): A Validation and Comparison against SSQ and VRSQ. *Virt Worlds*. 2023;2:16–35. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds2010002>.
73. Ugur E. Investigation of the Correlation Between the Visually Induced Motion Sickness Susceptibility Questionnaire and the Turkish Motion Sickness Susceptibility Questionnaire. *J Audiol Otol*. 2024;28(1):36–43. <https://doi.org/10.7874/jao.2023.00122>.
74. Watanabe H, Wang TY, Ando H, Mizushima H, Morita T, Emoto M, et al. Visually induced symptoms questionnaire (VISQ): A subjective evaluation method for biomedical effects induced by stereoscopic 3D video. *Appl Ergon*. 2024 May;117:104238. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104238>.
75. Daniel N, Malachowski J. Wavelet analysis of the EMG signal to assess muscle fatigue in the lower extremities during symmetric movement on a rowing ergometer. *Acta Bioeng Biomech*. 2023;25:2. <https://dx.doi.org/10.37190/ABB-02282-2023-04>.

8. Oświadczenia o współautorstwie.