



mgr inż. MARIUSZ WISŁKA (ORCID: 0000-0002-7145-6457)
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
DOI: 10.54215/BP.2025.2.4.Wiselka

Zmęczenie odczuwane podczas pracy z urządzeniami rzeczywistości rozszerzonej – wyniki badań wstępnych

Fot. Gerain0812/Bigstockphoto



Urządzenia wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości są coraz częściej wykorzystywane do celów zawodowych. Ze względu na postęp technologiczny i szybki rozwój tych urządzeń mogą one stwarzać nowe zagrożenia dla zdrowia użytkowników. W artykule zaprezentowano metodę pomiaru zmęczenia oczu oraz sprawności poznawczej użytkowników okularów rzeczywistości rozszerzonej, obejmującą wybrane testy psychomotoryczne oraz badania okulistyczne. Zaprezentowano także wyniki wstępnych badań, przeprowadzonych przy użyciu tej metody.

Słowa kluczowe: AR, zmęczenie, praca z komputerem

Fatigue felt while working with augmented reality devices – preliminary research results

Virtual and augmented reality devices are increasingly used for professional purposes. Due to technological progress and the rapid development of these devices, they may pose new health risks to users. The article presents a new method of measuring the fatigue of users of augmented reality glasses, including selected psychomotor tests and ophthalmological examinations. The results of preliminary research conducted using this method are also presented.

Keywords: AR, fatigue, computer work

Wstęp

Urządzenia wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości są obecnie coraz bardziej powszechne, aczkolwiek swoim początkiem sięgają prostego stereoskopu, czyli okularów wynalezionych w 1838 r., przez które widz spoglądał jednym okiem na określoną scenę, a drugim – na niemal identyczną, tyle że uchwyconą z innego punktu widzenia. Pozwalało to na uzyskanie wrażenia trójwymiarowości oglądanego obrazu. Stereoskop zaczął przybierać bardziej przystępny dla użytkowników kształt dzięki takim pionierom, jak: Morton Heilig (twórca Sensoramy – pierwszej immersyjnej technologii, często uznawanej za pierwsze urządzenie VR), Ivan Sutherland (twórca pierwszego zakładanego na głowę urządzenia rozszerzonej rzeczywistości) czy Nicole Stenger (twórczyni pierwszego immersyjnego, interaktywnego filmu). Dzisiaj urządzenia wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości znajdują szerokie zastosowanie w rozrywce, edukacji, przemyśle, służbie zdrowia czy w technologiach militarnych [1, 2].

Celem artykułu jest zaprezentowanie wstępnych wyników badań wpływu wybranego urządzenia rzeczywistości rozszerzonej (ang. *augmented reality* – AR) na zmęczenie oczu użytkowników oraz na ich sprawność poznawczą. Badania te obejmowały pomiary parametrów związanych z oceną funkcji wzroku, takich jak położenie punktu blizy akomodacji i konwergencji, oraz z oceną sprawności poznawczej użytkowników, określonej na podstawie testów psychomotorycznych i behawioralnych.

Charakter zmęczenia oczu wynikającego z użytkowania urządzenia AR

W przypadku długotrwałego korzystania z urządzenia AR występuje krótkotrwałe zjawisko pogorszenia funkcji wzroku poprzez zmniejszenie zdolności oka do akomodacji i konwergencji podczas obserwacji obiektów znajdujących się w bliskiej odległości [3].

Akomodacja jest procesem, podczas którego zmienia się zdolność skupiająca soczewki oka przy zmianie odległości obserwacji obiektu. Akomodacja, dzięki zmianie kształtu soczewki w wyniku skurczu mięśnia rzęskowego, zapewnia ostre widzenie przedmiotów znajdujących się w różnych odległościach od oka. Przy prawidłowej akomodacji oka na siatkówce występuje ostry obraz obserwowanego obiektu, przy czym jest to możliwe tylko w odniesieniu do określonego przedziału odległości obserwacji, nazywanym amplitudą akomodacji. Najbliższy punkt, dla którego oko na skutek akomodacji tworzy ostry obraz, określa się jako punkt bliski akomodacji (lub inaczej: punkt bliży) – P_B . Najdalszy punkt, dla którego oko jest w stanie wytworzyć ostry obraz na siatkówce, nazywa się punktem dalekim akomodacji (lub inaczej: punktem dali) – P_D .

Konwergencja jest natomiast symetrycznym, zbieżnym ruchem gałek ocznych do wewnątrz, mającym na celu doprowadzenie do obuocznej fiksacji obserwowanego przedmiotu (umożliwienia widzenia jednego obrazu złożonego z obrazów obu oczu). Za proces ten odpowiadają mięśnie zewnętrzne oka, a jeśli następuje spadek ich siły skurczu (na skutek zmęczenia mięśni), wtedy oddala się od oczu najbliższy punkt, przy którym osie obu oczu utrzymywane są w jednym punkcie zbieżności (tzn. oddala się punkt bliży konwergencji). Upośledzenie konwergencji objawia się podwójnym widzeniem.

Na procesy akomodacji i konwergencji mają wpływ takie czynniki, jak zmęczenie oczu, przyjmowanie leków czy zmiany chorobowe (np. presbopia). Gdy wiadomo, że w oku danej osoby nie występują żadne zmiany chorobowe oraz że ta osoba nie przyjmuje leków mających wpływ na proces akomodacji, badanie zmian amplitudy akomodacji pozwala określić zmęczenie oczu.

Można wskazać dwie konsekwencje stanu zmęczenia oczu, przekładające się na stan użytkownika urządzeń AR:

- **spadek wydajności**, który najczęściej objawia się spowolnieniem pracy i wpływa na poprawność jej

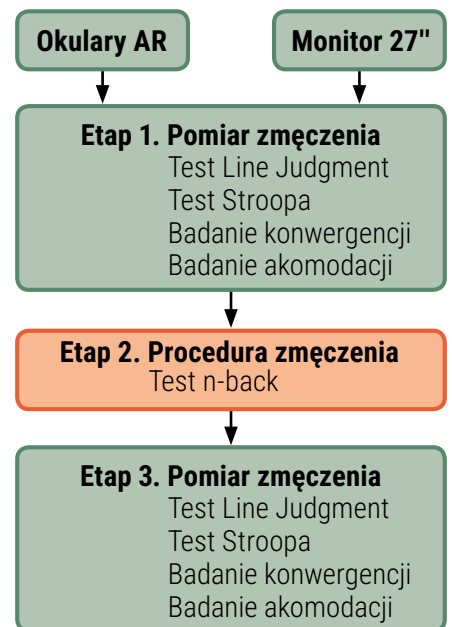
wykonywania. Spadek wydajności można głównie zaobserwować u osób wykonujących powtarzalne czynności oraz osób, od których wymaga się zarówno precyzji, jak i skupienia czy szybkiego reagowania. Tego rodzaju praca dodatkowo wywołuje stres wynikający m.in. z presji czasu;

- **spadek sprawności poznawczej**, czyli obniżenie zdolności do wykonywania pracy, która wymaga dużej kreatywności, skupienia się na zadaniu oraz zaangażowania posiadanych zdolności i wiedzy, a która nie wiąże się z odczuwaniem zbyt dużej presji czasu.

W celu określenia zarówno spadku wydajności, jak i sprawności poznawczej, można przeprowadzić pomiary sprawności psychomotorycznej za pomocą odpowiednich testów przed wykonaniem i po wykonaniu pracy. W pomiarach spadku wydajności najlepiej sprawdzają się testy pozwalające ocenić, czy dana osoba jest w stanie wykonać proste zadania z dużą precyzją i w odpowiednim (najlepiej ograniczonym) czasie. Zazwyczaj w przypadku zmęczenia pracownika parametry czasu reakcji i poprawności odpowiedzi w tego typu testach wypadają gorzej po pracy niż przed jej rozpoczęciem. W testach sprawdzających sprawność poznawczą kluczowe jest badanie poprawności odpowiedzi. Wyznacznikiem może być również czas reakcji, jednak najważniejsze jest to, aby użytkownik okularów AR zachował zdolność do analizowania sytuacji przed pracą i po jej wykonaniu.

Metoda pomiaru zmęczenia oczu na skutek pracy z wykorzystaniem rozszerzonej rzeczywistości

W ramach prac realizowanych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym (CIOP-PIB) opracowano metodę badania zmęczenia związanego z użytkowaniem urządzeń AR. Metoda obejmuje serię wybranych testów psychomotorycznych oraz badań okulistycznych, przeprowadzanych przed testami i po serii testów mających na celu uzyskanie efektu zmęczenia oka użytkownika urządzenia. Umożliwia ona pomiar spadku wydajności, wydolności wzrokowej i sprawności poznawczej użytkownika. Jako odniesienie wykorzystywany jest typowy monitor ekranowy o przekątnej 27" i o rozdzielczości 1280 x 768 w trybie 16:9. Porównanie z monitorem pozwala określić, czy stosowanie okularów AR powoduje niepożądane efekty w posta-



Rys. 1. Schemat sesji badawczej służącej do oceny zmęczenia podczas pracy z urządzeniami rzeczywistości rozszerzonej

Fig. 1. Scheme of the test session for assessing fatigue while working with augmented reality devices

ci większego zmęczenia lub spadku wydajności widzenia. Badania z użyciem monitora przeprowadzane są w identycznych warunkach jak w przypadku badań z okularami AR. Kontrolowana jest zwłaszcza odległość od monitora ($60 \text{ cm} \pm 15 \text{ cm}$), tak by obraz widziany w okularach i na monitorze był tej samej wielkości. W ramach badania użytkownik ma do wykonania taki sam zestaw testów w sesji badawczej z użyciem okularów AR oraz z monitorem ekranowym.

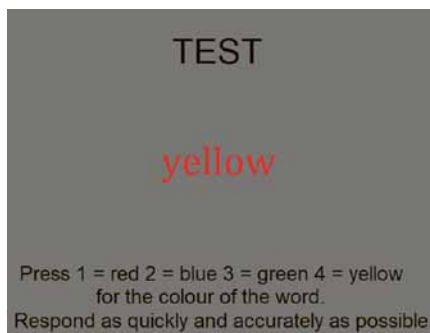
Każda sesja badawcza obejmuje trzy etapy (rys. 1).

Etap 1. polega na ocenie stanu zmęczenia oczu przed użyciem urządzenia AR, która obejmuje serię testów psychomotorycznych oraz badań okulistycznych akomodacji i konwergencji oczu. W ramach testów psychomotorycznych wykonuje się test Line Judgment i test Stroopa.

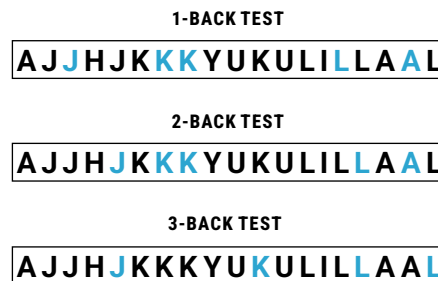
W teście Line Judgment, przeznaczonym do badania ogólnej wydajności uczestnika, porównuje się dwie linie różniące się nieznacznie długością (rys. 2). Presja czasu wymaga stałego skupienia wzroku na wyświetlanym obrazie. Badanie wykonywane jest w trzech seriach po 50 zadań, z czasem przełączania obrazu 2000 ms, 1000 ms i 700 ms. Mierzonymi wartościami są poprawność odpowiedzi i czas reakcji. Test jest kontrolowany przez program komputerowy PEBL2 [4]. Właściwe badanie poprzedzone jest serią testów próbnych, służących przeszkoleniu uczestników badania. W tym celu wykonuje się cztery zadania próbne przed



Rys. 2. Ilustracja testu Line Judgment
Fig. 2. Illustration of the Line Judgment test



Rys. 3. Ilustracja testu Stroopa
Fig. 3. Illustration of the Stroop test



Rys. 4. Ilustracja testu n-back
Fig. 4. Illustration of the n-back test

każdym zakresem czasowym: 2000 ms, 1000 ms i 700 ms.

Test Stroopa jest używany do oceny sprawności funkcji wykonawczych, plastyczności procesów poznawczych i szybkości przetwarzania informacji. Użytkownik wybiera kolor wyświetlanej nazwy koloru, który może być niezgodny z kolorem, w jakim ta nazwa została wyświetlona (rys. 3). W tym badaniu test obejmuje 50 obrazów o losowo wybranych kolorach, a maksymalny czas reakcji użytkownika wynosi 3 s w przypadku każdego obrazu. Tekst wyświetlany jest w jednym z czterech kolorów: czerwonym, niebieskim, zielonym lub żółtym. Mierzonymi wartościami są poprawność odpowiedzi i czas reakcji. Test jest kontrolowany przez program komputerowy PEBL2. Właściwe badanie jest poprzedzone serią 24 testów próbnych, mających na celu przeszkolenie uczestników badania.

Z kolei badania okulistyczne są wykonywane przy użyciu linijki RAF (*Royal Air Force rule*) i obejmują badanie konwergencji oczu i badanie akomodacji pojedynczego oka (zob. fot.).

Badanie okulistyczne konwergencji oczu przy użyciu linijki RAF pozwala na pomiar punktu bliskiego (bliży) konwergencji (ang. *near point of convergence*, NPC) [5]. Obraz pionowej linii przesuwany jest powoli w stronę oczu badanej osoby do momentu stwierdzenia przez nią, że obraz linii się rozdzielił. Wynik pomiaru stanowi średnią z trzech niezależnych pomiarów.

Z kolei badanie okulistyczne akomodacji pojedynczego oka przy użyciu linijki RAF pozwala na pomiar punktu bliskiego (bliży) akomodacji (ang. *near point of accommodation*, NPA). W tym przypadku tekst przesuwany jest powoli w stronę oka badanej osoby do momentu stwierdzenia przez nią, że obserwowany tekst uległ rozmyciu. Wynik pomiaru stanowi średnią z trzech niezależnych pomiarów. Badanie wykonuje się niezależnie dla prawego i lewego oka.

Etap 2. sesji ma na celu zmęczenie mentalne i zmęczenie oczu użytkownika podczas korzystania przez niego z testowanego urządzenia AR. W badaniu wykorzystuje się do tego standardowy test psychomotoryczny n-back, kontrolowany przez środowisko oprogramowania PEBL2 (rys. 4). Test n-back służy do oceny wzrokowej pamięci operacyjnej i jest szeroko stosowany w badaniach neuropsychologicznych. Podczas każdej serii jednorazowo wyświetlana jest pojedyncza litera. Uczestnik musi zachować ją w pamięci krótkotrwałej podczas prezentowania kolejnych liter. Zadanie polega na sprawdzeniu, czy dany znak pojawił się *n* znaków wcześniej, i na naciśnięciu odpowiedniego klawisza na klawiaturze. W bada-

niu zastosowano sekwencję testów 1-back, 2-back i 3-back, po 100 wyświetlanych znaków.

Etap 3. sesji polega na powtórzeniu etapu 1. w celu porównania poziomu zmęczenia przed testem zmęceniowym (przeprowadzonym w etapie 2.) i po nim.

Wyniki i ich omówienie

Kandydaci do wstępnych badań, mających na celu weryfikację zaproponowanej metody badania zmęczenia użytkowników urządzeń AR, zostali najpierw przebadani przez lekarza okulistę, który sprawdzał stan oczu i wzroku poszczególnych osób, w tym:

- ostrość wzroku do dali,
- ostrość wzroku do bliży,
- refrakcję oczu po cykloplegii,
- ruchomość gałek ocznych,
- widzenie stereoskopowe,
- stabilność filmu łzowego,
- widzenie barwne,
- stan odcinka przedniego oczu.

Chodziło o to, aby wyeliminować wpływ niepożądanych czynników – takich jak wymagające korekcji wady refrakcji, uszkodzenie oka czy choroby okulistyczne – na przebieg i wyniki docelowego badania. Ponadto zrezygnowano z udziału osób korzystających z okularów korekcyjnych – z uwagi na problem z poprawnym założeniem okularów AR.

Ostatecznie do badań z wykorzystaniem okularów rzeczywistości rozszerzonej Epson Moverio BT-35E zakwalifikowano cztery osoby, którym na potrzeby badania przyporządkowano identyfikatory: Pilo_0, Pilo_1, Pilo_2 i Pilo_3. Wyniki uzyskane przez osoby uczestniczące w eksperymencie zestawiono w tab. 1–4.

Wyniki badania wydajności przy pomocy testu psychomotorycznego Line Judgement nie wykazują jednoznacznego trendu. Obserwowane w wielu przypadkach skrócenie czasu reakcji, zarówno w trakcie pracy w okularach AR, jak i z ekranem monitora, wynika z procesu



Fot. Badanie okulistyczne wykonywane z użyciem linijki RAF (fot. archiwum CIOP-PIB)
Photo. Ophthalmological examination performed using the RAF ruler (photo: CIOP-PIB archive)

Tabela 1. Wyniki testu *Line Judgement* dla trzech wartości czasu wyświetlania linii *t*, wykonywanego przed badaniem i po badaniu z użyciem monitora ekranowego
 Table 1. *Line Judgement* test results for three values of the line display time *t*, performed before and after the test with the use of a screen monitor

Czas wyświetlania linii <i>t</i>	Parametr		ID uczestnika badań			
			Pilo_0	Pilo_1	Pilo_2	Pilo_3
2000 ms	Poprawność [%]	przed	80	86	90	92
		po	84	88	88	90
	Czas reakcji [ms]	przed	655	643	681	1142
		po	586	527	557	892
1000 ms	Poprawność [%]	przed	76	86	92	82
		po	88	80	86	78
	Czas reakcji [ms]	przed	556	486	627	724
		po	574	450	547	680
700 ms	Poprawność [%]	przed	90	84	74	84
		po	88	72	80	80
	Czas reakcji [ms]	przed	470	431	523	525
		po	507	449	503	512

Tabela 2. Wyniki testu *Line Judgement* dla trzech wartości czasu wyświetlania linii *t*, wykonywanego przed badaniem i po badaniu z użyciem okularów AR
 Table 2. *Line Judgement* test results for three values of the line display time *t*, performed before and after the test with the use of AR glasses

Czas wyświetlania linii <i>t</i>	Parametr		ID uczestnika badań			
			Pilo_0	Pilo_1	Pilo_2	Pilo_3
2000 ms	Poprawność [%]	przed	92	78	80	84
		po	84	88	88	90
	Czas reakcji [ms]	przed	621	715	657	985
		po	586	527	557	892
1000 ms	Poprawność [%]	przed	88	82	82	74
		po	88	80	86	78
	Czas reakcji [ms]	przed	521	562	625	752
		po	574	450	547	680
700 ms	Poprawność [%]	przed	78	78	60	60
		po	88	72	80	80
	Czas reakcji [ms]	przed	469	517	591	572
		po	507	449	503	512

Tabela 3. Wyniki pomiaru punktu bliskiego akomodacji i konwergencji – badania przed monitorem ekranowym (OP – oko prawe, OL – oko lewe)
 Table 3. Measurements results of the near point of accommodation and convergence, tests with the monitor (OP – right eye, OL – left eye)

Parametr		ID uczestnika badań			
		Pilo_0	Pilo_1	Pilo_2	Pilo_3
Punkt bliski (bliży) akomodacji OP [cm]	przed	9,3	28,0	15,3	17,0
	po	10,0	27,3	17,7	21,0
Punkt bliski (bliży) akomodacji OL [cm]	przed	8,7	18,7	18,0	14,0
	po	9,0	20,7	21,0	20,3
Punkt bliski (bliży) konwergencji obuocznie [cm]	przed	8,0	17,3	11,3	13,3
	po	8,3	18,3	13,7	16,0

Tabela 4. Wyniki pomiaru punktu bliskiego (bliży) akomodacji i konwergencji – badania w okularach AR (OP – oko prawe, OL – oko lewe)
 Table 4. Measurements results of the near point of accommodation, tests with AR glasses (OP – right eye, OL – left eye)

Parametr		ID uczestnika badań			
		Pilo_0	Pilo_1	Pilo_2	Pilo_3
Punkt bliski akomodacji OP [cm]	przed	12,0	31,0	16,7	15,0
	po	13,0	27,3	20,0	23,0
Punkt bliski akomodacji OL [cm]	przed	11,7	23,3	15,7	13,3
	po	12,3	20,7	19,0	25,0
Punkt bliski konwergencji obuocznie [cm]	przed	10,0	19,0	12,0	12,3
	po	10,3	18,7	14,0	32,3

uczenia się uczestników, jaki zachodził podczas wykonywanego testu.

W przypadku testu Stroopa nie wykryto znaczących różnic w obrębie badanej grupy. Jej uczestnicy odpowiadali poprawnie w jednakowym stopniu w przypadku zastosowania zarówno okularów AR, jak i ekranu komputera.

Największe różnice zaobserwowano w odniesieniu do amplitudy akomodacji. Wartości tego parametru, zmierzone przed testem zmęczeniowym i po nim, były na ogół większe w przypadku pracy z wykorzystaniem okularów AR. Istnieje więc podstawa do stwierdzenia, że okulary AR mogą powodować zmęczenie wzroku poprzez zaburzenie wydolności oczu, a zwłaszcza ich zdolności do akomodacji.

Podsumowanie

Przeprowadzone wstępne badania ujawniły potencjalne problemy z akomodacją oczu po długotrwałym użytkowaniu okularów AR. Objawia się to przejściowym oddaleniem punktu bliskiego akomodacji. Prawdopodobnie wynika to z występującego konfliktu konwergencji

i akomodacji (ang. *vergence accommodation conflict* – VAC), który związany jest z różnicą pomiędzy odległością konwergencji oczu, mierzoną od wirtualnej płaszczyzny obrazowania, a odległością akomodacji oka, mierzoną od rzeczywistej płaszczyzny wyświetlacza.

Wyniki badań wskazują na zasadność rozszerzenia serii psychomotorycznych testów szkoleniowych przed etapem badania zmęczenia, aby skuteczniej wyeliminować wpływ poziomu wyszkolenia uczestników badania na ostateczne wyniki. Z kolei etap badania, obejmujący test zmęczeniowy, może zostać zwielokrotniony, aby lepiej dało się zaobserwować niepożądane skutki długotrwałego użytkowania badanych urządzeń AR.

Uzyskane wyniki wskazują na większe zmęczenie narządu wzroku podczas pracy w okularach AR. Badanie potwierdza, że zaproponowana metodyka może znaleźć praktyczne zastosowanie w badaniu i ocenie urządzeń AR stosowanych na stanowiskach pracy. Podobne badania będą więc kontynuowane w przyszłości w celu sprawdzenia wpływu innych urządzeń AR na zmęczenie odczuwane przez użytkowników.

BIBLIOGRAFIA

- [1] FLAVIAN C. The impact of virtual, augmented and mixed reality technologies on the customer experience. *Journal of Business Research*. 2019, 100: 547–560.
- [2] CEARLEY D.W. et al. Top 10 strategic technology trends for 2018. Gartner, Inc. 2017, G00327329.
- [3] MAIMONE A., GEORGIOU A., KOLLIN J.S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2017, 36(4): 1–16; doi: 10.1145/3072959.3073624.
- [4] MUELLER S.T. PEBL: The Psychology Experiment Building Language. <https://pebl.sf.net>.
- [5] SHARMA L.P. RAF near point rule for near point of convergence – a short review. *Annals of Eye Science*. 2017, 2: 1–6; doi: 10.21037/aes.2017.02.05.

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” (zadanie nr 2.SP.09 pt. „Identyfikacja i ocena zagrożeń promieniowaniem optycznym oraz uciążliwości związanych ze stosowaniem urządzeń rzeczywistej rozszerzonej i wirtualnej”), finansowanego w latach 2020–2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków ministra właściwego ds. pracy. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.