PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

OPEN ACCESS

Dawid BUDNAROWSKI[1], Dawid JERECZEK[2], Kalina DETKA[3]
ORCID: [1]0009-0005-1200-1793, [2]0009-0007-0228-7331, [3]0000-0002-1584-3874
DOI: 10.15199/48.2025.11.27

Zastosowanie technologii immersyjnych w przemyśle 4.0

The use of immersive technologies in Industry 4.0

[1] mgr inż. Dawid Budnarowski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Zakład Telekomunikacji Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, e-mail: d.budnarowski@we.umg.edu.pl
[2] mgr inż. Dawid Jereczek, Uniwersytet Gdański, Katedra Informatyki Ekonomicznej, ul. Piaskowa 9, 81-864 Sopot, e-mail: dawid.jereczek@ug.edu.pl
[3] dr hab. inż. Kalina Detka, prof. UMG, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Energoelektroniki, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, e-mail: k.detka@we.umg.edu.pl

Adres do korespondencji: d.budnarowski@we.umg.edu.pl

Streszczenie: Przemysł 4.0 to koncepcja, która obejmuje automatyzację, Przemysłowy Internet Rzeczy (IIoT, ang. Industrial Internet of Things), analitykę Big Data, Sztuczną Inteligencję (AI, ang. Artificial Intelligence) oraz chmurę obliczeniową w celu podnoszenia efektywności, jakości i elastyczności wytwarzania. W artykule przedstawiono technologie immersyjne Wirtualną Rzeczywistość (VR, ang. Virtual Reality), Rozszerzoną Rzeczywistość (AR, ang. Augmented Reality) i Mieszaną Rzeczywistość (MR, ang. Mixed Reality) wraz z ich zastosowaniami w szkoleniach BHP, utrzymaniu ruchu i innych dziedzinach przemysłu. Zaprezentowano autorski symulator VR dla rafinerii, odwzorowujący rzeczywistą instalację i kompletny scenariusz reagowania na niebezpieczne zdarzenie (m.in. obsługa oczomyjki), który ułatwia zarządzanie procesem szkoleniowym. Innowacyjność rozwiązania polega na dynamicznej symulacji, ograniczeniu pola widzenia podczas incydentu, kryteriach zaliczenia opartych na zachowaniu użytkownika oraz możliwości rejestrowania metryk szkoleniowych do obiektywnej oceny skuteczności.

Słowa kluczowe: VR, AR, MR, przemysł 4.0, symulator szkoleniowy

Abstract: Industry 4.0 is a concept that encompasses automation, the Industrial Internet of Things (IIoT), Big Data analytics, Artificial Intelligence (AI), and cloud computing to improve manufacturing efficiency, quality, and flexibility. This article presents immersive technologies: Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), and Mixed Reality (MR), along with their applications in occupational health and safety training, maintenance, and other industrial areas. A proprietary VR simulator for refineries is presented, emulating a real-world installation and a complete incident response scenario (including operation of an eyewash station), which facilitates training process management. The innovative nature of the solution lies in the dynamic simulation of field of view limitations during an incident, passing criteria based on user behavior, and the ability to record training metrics for objective evaluation of effectiveness.

Keywords: VR, AR, MR, Industry 4.0, symulator szkoleniowy

Wstęp

Początek ery przemysłowej sięga przełomu XVII i XVIII wieku, kiedy Thomas Newcomen opracował pierwszą maszynę parową. Maszyna ta zaprojektowana była z myślą pompowania wody z kopalń [1]. Projekt ten jednak charakteryzował się szeregiem wad, a przede wszystkim niską wydajnością zaproponowanego wynalazku. Rozwiązanie to później udoskonalił James Watt uzyskując wysoką sprawność zaprojektowanej maszyny a tym samym umożliwiając szersze zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu [2]. Wynalezienie maszyny parowej traktuje się jako początek rewolucji przemysłowej (przemysł 1.0), która była momentem zwrotnym w zakresie zmiany sposobu produkcji, transportu i organizacji pracy a rozwój fabryk, kolei, portów, kopalni itp. nabrał tempa [3].

Koniec XIX wieku uznaje się za początek drugiej rewolucji (Przemysł 2.0) przemysłową. Kluczową rolę w tym wypadku odegrało upowszechnienie energii elektrycznej, opracowanie silnika spalinowego i powstanie pierwszej ruchomej linii montażowej przez Henrego Forda w 1913 roku. Pozwoliło to skrócić czas produkcji jednego samochodu z kilkunastu godzin do około dwóch [4].

Początek trzeciej rewolucji przemysłowej (Przemysł 3.0) datuje się na lata 70-te XX wieku, kiedy na szeroką skalę rozpoczęto produkcję elementów

półprzewodnikowych, na bazie których rozwijano dalej elementy scalone, układy mikroprocesorowe itp. Wprowadzenie programowalnego sterownika logicznego Modicon 084, w 1969 roku, zapoczątkowało erę automatyki przemysłowej. W odróżnieniu od wcześniejszych etapów rewolucji, skoncentrowanych na mechanizacji i napędzie elektrycznym, trzecia rewolucja przemysłowa akcentowała inteligentne sterowanie procesami produkcyjnymi dzięki automatyzacji i cyfryzacji [4].

Obecnie jesteśmy świadkami czwartej rewolucji przemysłowej (Przemysł 4.0), której fundamentem jest tzw. inteligencja maszyn oraz IoT (Internet of Things) [5, 6].

Termin *Industrie 4.0* został publicznie wprowadzony podczas Hannover Messe w 2011 r., w ramach inicjatyw powiązanych ze strategią High-Tech 2020 rządu Niemiec (strategię przedstawiono w 2010 r., a *Aktionsplan* (Plan Działań) przyjęto w 2012 r.). Koncepcja zakłada cyfrową transformację gospodarki przez integrację systemów cyber-fizycznych IIoT (Industrial Internet of Things), analityki danych i AI (Artificial Intelligence).

Z literatury oraz raportów przedsiębiorstw wdrażających tę koncepcję połączenie sztucznej inteligencji, automatyzacji oraz Internetu rzeczy usprawnia i zwiększa proces produkcji. Systemy produkcyjne stają się bardziej złożone, a jednocześnie dzięki pełnej automatyzacji i współpracy maszyn z człowiekiem elastyczne i bardziej efektywne. Pozwala to na zwiększenie konkurencyjności przedsiębiorstw, poprawę jakości i ich wydajności [5, 6].

Jak wspomniano wcześniej, fundamentem Przemysłu 4.0 jest sztuczna inteligencja oraz IoT. Jednak poza wspomnianymi obszarami istnieje jeszcze pięć innych, które wraz ze wspominanymi dopiero właściwe definiują to pojęcie. Poniżej skrótowo opisano każdy obszar wpisujący się w omawianą koncepcję [5, 6].

Internet Rzeczy – częściej też nazywany Przemysłowym Internetem Rzeczy (IIoT, ang. Industrial Internet of Things). Ideą tego obszaru podobnie jak zwykłego IoT jest gromadzenie danych z tym, że w IIoT z procesów produkcyjnych, a następnie ich przetwarzanie w jednostkach przetwarzania danych. Dane zbierane są z urządzeń zewnętrznych jak czujniki, siłowniki robotów itp. [5].

Big Data – technologia związana z przetwarzaniem danych. Na podstawie zgromadzonych danych możliwa jest optymalizacja działania systemów produkcyjnych i poprawa efektywności procesu produkcyjnego. Dzięki zebranym danym można identyfikować trendy, wzorce, nieprawidłowości [5].

Sztuczna Inteligencja (AI, ang. Artificial Intelligence) – związana jest z uczeniem maszynowym i głębokim do analizy i przetwarzania danych. W konsekwencji do prognozowania przyszłych efektów. Technologia ta jest kluczowa w kontekście usprawniania procesu podejmowania decyzji, poprawy jakości i wydajności produkcji [5, 6].

Automatyzacja procesów (RPA, ang. Robotic Process Automation) obejmuje automatyzację zadań powtarzalnych i czasochłonnych przy wykorzystaniu robotów redukując potencjalne błędy pracy ludzkiej a tym samych zwiększając efektywność procesu produkcyjnego [5].

Chmura obliczeniowa (CC, ang. Cloud Computing) – umożliwia analizę i przetwarzanie danych znajdujących się na zewnętrznych serwerach. Rozwiązanie to pozwala na pracę na danych z dowolnego miejsca [6].

Produkcja przyrostowa (AM) – technologia wykorzystująca możliwości trójwymiarowego druku. Pozwala to na szybką i bardziej efektywną oraz elastyczną produkcję części i narzędzi, do których nie ma dostępu w określonym momencie minimalizując ryzyko m.in. zatrzymania produkcji [5].

Wirtualna Rzeczywistość, Rozszerzona Rzeczywistość i Mieszana Rzeczywistość – zaliczane do technologii immersyjnych.

Celem niniejszej pracy jest omówienie oraz wskazanie zastosowań technologii immersyjnych w Przemyśle 4.0. W rozdziale 2, 3 i 4 opisano odpowiednio technologię VR, AR i MR, W rozdziale 5 omówiono przykładowe zastosowania wspomnianych technologii, a przykład autorskiego rozwiązania zaprezentowano w rozdziale 6.

Technologia VR

Technologia VR (ang. Virtual Reality) oznacza w pełni cyfrowe środowisko, którego użytkownik doświadcza za pomocą gogli VR. Świat rzeczywisty zostaje całkowicie zastąpiony przez generowany komputerowo świat 3D. Interakcja odbywa się w czasie rzeczywistym (kontrolery lub śledzenie dłoni). Kluczowym elementem są gogle (Rys. 1) z odpowiednim wyświetlaczem w którym obraz generowany jest stereoskopowo (w dwóch perspektywach, oddzielnie dla każdego oka, z korekcją paralaksy).

Dzięki wbudowanym sensorom ruch, pozycja i orientacja głowy oraz ciała użytkownika są śledzone, co wraz ze śledzeniem ruchu dłoni lub kontrolerów oraz dźwiękiem przestrzennym umożliwia pełne zanurzenie sensoryczne [8]. Początkowo główną dziedziną popularyzującą VR była rozrywka i gry.

Rys. 1. Gogle Meta Quest 3 [7]

Wraz z rozwojem warstwy sprzętowej oraz programowej coraz częściej zalety VR były zauważane również przez przedsiębiorców szukających zastosowań profesjonalnych. Technologię VR wykorzystują również nauczyciele, inżynierowie, architekci oraz lekarze, którzy dzięki niej mogą realizować symulacje kosztownych w rzeczywistości projektów, zabiegów czy szkoleń. Umożliwia im to nauczanie w nowatorskich warunkach, wzbogacając proces edukacji o dodatkowe bodźce i doświadczenia.

Na rynku funkcjonują trzy klasy gogli VR: standalone (samodzielne), przewodowe (PC/konsole) oraz mobilne (z wykorzystaniem smartfona). Gogle standalone zapewniają mobilność i prostotę uruchomienia kosztem mniejszej mocy obliczeniowej niż zestawy przewodowe. Zestawy przewodowe oferują najwyższą jakość renderingu i najniższe opóźnienia, wymagając wydajnego komputera. Rozwiązania mobilne są dziś rzadko stosowane ze względu na ograniczenia jakości i ergonomii.

Projektując rozwiązania VR korzysta się najczęściej z jednego z dwóch silników graficznych wykorzystywanych do tworzenia gier komputerowych: Unity [9] lub Unreal Engine [10]. Oba silniki oferują specjalne narzędzia i biblioteki umożliwiające obsługę gogli VR i kontrolerów ruchu. Proces tworzenia aplikacji VR zaczyna się od stworzenia sceny 3D, czyli przestrzeni z obiektami 3D. Następnie dodaje się interakcje np. chwytanie przedmiotów i poruszanie się po świecie. Logikę działania implementuje się z wykorzystaniem języka C# (Unity) lub C++/Blueprint (Unreal Engine).

Technologia AR

Technologia AR nakłada cyfrowe treści na obraz świata rzeczywistego widziany przez użytkownika – najczęściej przez kamerę smartfona lub tabletu. W przeciwieństwie do VR, AR wzbogaca otoczenie zamiast je zastąpić. Początkowo AR opierał się na znacznikach, które były rozpoznawane i śledzone przez algorytmy i to dzięki nim w rzeczywistym świecie pozycjonowane były obiekty wirtualne. Obecnie popularniejsze są metody korzystające z algorytmów głębokiego uczenia, dzięki którym rozpoznawane są obiekty i analizowane jest otoczenie w polu widzenia kamery i na tej podstawie cyfrowe obiekty dodawana są do świata rzeczywistego. Nierzadko analiza obrazu wspomagana jest dodatkowo sensorami wbudowanymi w urządzenie – akcelerometrem, żyroskopem i GPS. Wykorzystanie smartfonów do AR jest najtańszym i najpraktyczniejszym rozwiązaniem, choć wskazuje się też, że również urządzenia typu HMD (ang. Head Mounted Display) są urządzeniami realizującymi AR [11]. Coraz częściej jednak technologię wykorzystującą urządzenia HMD klasyfikuje się już jako MR. Mniej popularną formą AR są również rozwiązania korzystające z komputera z kamerą. Były to rozwiązania szczególnie popularne w pierwszych fazach rozwoju technologii AR głównie ze względu na niską moc obliczeniową smartfonów. Obecnie, gdy smartfony oferują już lepszej klasy procesory, AR na smartfonie wymaga jedynie odpowiedniej aplikacji. Poza najpopularniejszą formą w postaci aplikacji instalowanej na urządzeniach mobilnych coraz częściej można spotkać rozwiązania oparte o WebAR. W tym przypadku do interakcji z AR nie jest konieczne instalowanie aplikacji, a wystarczy odpowiednio przygotowana strona w przeglądarce internetowej. WebAR nie daje jeszcze tak dużych możliwości jak AR w dedykowanej aplikacji, ale technologia ta jest nieustannie rozwijana i pozwala na osiąganie coraz to lepszych efektów i doświadczeń.

AR ma wiele zastosowań w edukacji, opiece zdrowotnej, handlu, przemyśle, marketingu i rozrywce [12]. Począwszy od prostych prezentacji produktowych poprzez instrukcje serwisowe, instrukcje obsługi, aż po gry. Tego typu instrukcje w znacznym stopniu ułatwiają identyfikację problemu, lokalizację danej części w całym obiekcie i tym samym przyczyniają się do szybszej naprawy. Podobnie jak w przypadku VR do tworzenia aplikacji AR wykorzystuje się silnik graficzny Unity oraz Unreal Engine. Podczas prac programistycznych niezbędne jest wykorzystanie specjalistycznych bibliotek. Przygotowując rozwiązanie oparte o WebAR, programista korzysta z technologii JavaScript i jednej z wielu dostępnych na rynku bibliotek. Dodatkową gałąź AR stanowią efekty graficzne nakładane na obraz z kamery dostępne

w mediach społecznościowych takich jak TikTok, Snapchat czy dawniej też na Facebooku i Instagramie [13], gdzie całe doświadczenie AR projektowane jest w narzędziach dostarczonych przez te platformy.

Technologia MR

Trudno wskazać jednoznaczną definicję technologii MR, którą zaaprobowało zarówno środowisko akademickie i biznesowe. Powszechnie znane klasyfikacje rzeczywistości mieszanej mają swoje ograniczenia i niejasności terminologiczne [14]. Najczęściej jednak za MR uznaje się połączenie technologii VR i AR. Użytkownik nadal widzi rzeczywiste otoczenie (jak w AR), ale dodatkowo może w pełni wchodzić w interakcję z cyfrowymi elementami, które są osadzone w przestrzeni, reagują na gesty dłoni, ruch oczu, głos czy kontrolery. Podobnie jak w AR możliwe jest tu rozpoznawanie otoczenia i pozycjonowanie cyfrowych elementów np. na stole. Rozpoznawanie otoczenia oznacza tu zestaw technik, dzięki którym urządzenie rozumie geometrię i znaczenie przestrzeni wokół użytkownika w czasie rzeczywistym. Obejmuje to m.in. tworzenia mapy 3D pomieszczenia, wykrywanie płaszczyzn i krawędzi, umożliwianie okluzji (cyfrowe obiekty mogą być zasłaniane przez realne) szacowanie oświetlenia i odbić oraz coraz częściej rozpoznawanie semantyczne podstawowych klas obiektów. Dzięki temu obiekty cyfrowe mogą się zachowywać jak prawdziwe. Do korzystania z MR potrzebujemy urządzenia (gogli) z wbudowanymi zaawansowanymi sensorami, skanerami głębi, kamerami, żyroskopem by w czasie rzeczywistym zmapować przestrzeń, w której przebywa użytkownik. Dzięki temu możliwa jest precyzyjna lokalizacja i zakotwiczenie elementów cyfrowych w rzeczywistym świecie. Niewątpliwą zaletą tej technologii jest wysoki poziom bezpieczeństwa. Użytkownik może wejść w interakcję w wirtualnymi obiektami nie tracąc kontaktu z rzeczywistym otoczeniem widząc je cały czas dzięki kamerom w goglach. Brak konieczności tworzenia pełnych wirtualnych światów pozytywnie wpływa też na finalny koszt tworzonej aplikacji, który wynika ze znacznie mniejszej ilości obiektów 3D niezbędnych do wytworzenia całego doświadczenia MR w stosunku do analogicznego rozwiązania w technologii VR.

Technologia MR, podobnie jak AR i VR znajduje swoje zastosowanie w obszarze szkoleniowym, szczególnie tam, gdzie interesuje nas obsługa czy serwis pojedynczych elementów bez konieczności odtwarzania całej scenerii. Równie przydatna okazuje się w rozrywce, obsłudze klienta czy szkoleniach z zakresu kompetencji miękkich (szczególnie w połączeniu ze sztuczną inteligencją). Proces wytwarzania rozwiązań MR jest podobny do tego znanego z AR i VR. Do tworzenia aplikacji MR używa się głównie Unity [9] i Unreal Engine [10] w połączeniu z SDK przeznaczonym dla konkretnych urządzeń. Twórca aplikacji buduje przestrzeń 3D i umieszcza w niej cyfrowe obiekty i definiuje ich zachowanie w zależności od danych z otoczenia np. to czy dany obiekt ma się pojawić tylko na stole, czy ma reagować na jakiś gest dłoni, spojrzenie, komendę głosową, czy wskazanie kontrolerem. Programista pisze kod m.in w językach takich jak C# (Unity), C++/Blueprinty (Unreal Engine).

Porównanie wybranych cech wszystkich 3 technologii przedstawiono w tabeli 1 poniżej.

Tabela 1. Porównanie wybranych cech technologii AR, VR, MR

Cecha	AR	VR	MR
Widoczność świata realnego	Tak	Nie (pełne środowisko cyfrowe)	Tak
Rozpoznawanie elementów otoczenia	Płaszczyzny (ograniczona)	Brak	Siatka 3D i/ lub semantyka obiektów
Interakcja z obiektami cyfrowymi	Wskazanie/dotyk na ekranie	Pełna w świecie VR	Pełna z okluzją i kolizjami względem obiektów rzeczywistych
Typowe urządzenia	Smartfon, tablet	Gogle VR	Gogle MR
Śledzenie dłoni/ kontrolerów	Zwykle brak (ekran dotykowy)	Kontrolery i/lub śledzenie dłoni	Kontrolery i/lub śledzenie dłoni

Zastosowania technologii immersyjnych w przemyśle 4.0

Technologie immersyjne (AR, VR, MR) odgrywają coraz większą rolę w czwartej rewolucji przemysłowej, która opiera się na automatyzacji, zwiększaniu efektywności operacyjnej i poprawie bezpieczeństwa pracy oraz integracji świata cyfrowego z fizycznym. Technologie te pozwalają na bardziej intuicyjną interakcję z danymi, maszynami i środowiskiem pracy. Ich zastosowania obejmują wiele kluczowych obszarów działalności produkcyjnej i inżynierskiej:

- Szkolenia immersyjne i symulatory – bezpieczne, powtarzalne scenariusze (pożar, wyciek, awaria) z metrykami (czas reakcji, kompletność procedur, błędy krytyczne) i kryteriami zaliczenia opartymi na ocenie zachowań. Eliminują ryzyko uszkodzenia realnego sprzętu jak i chronią przed błędami, które mogłyby prowadzić do uszczerbku na zdrowiu.
- Wsparcie utrzymania ruchu – wyświetlanie instrukcji kontekstowych, podgląd danych z czujników maszyn w czasie rzeczywistym (np. tempera-

tura, wibracje, ciśnienie, ostatni przegląd, przebieg itp.), system może podpowiadać odpowiednie kroki serwisowe, terminy przeglądów oraz umożliwiać zdalne wsparcie eksperta
- Projektowanie i prototypowanie – ocena ergonomii, funkcjonalności i dostępności bez fizycznych prototypów
- Kompetencje miękkie – realistyczne szkolenia pracowników z zakresu kompetencji miękkich np. trening reakcji w sytuacjach stresowych z rejestracją i analizą zachowań (np. komunikacja, przywództwo)

Zastosowanie nowych technologii w Przemyśle 4.0 w związku z rosnącą integracją z ciałem człowieka skutkuje większą bliskością z ludzkimi zmysłami oraz wyższym poziomem immersyjnego doświadczenia, a to prowadzi do większej satysfakcji i zaangażowania emocjonalnego. Doświadczenia stworzone z wykorzystaniem technologii immersyjnych lepiej zapadają w pamięć, a to przekłada się na lepsze efekty szkoleniowe [14]. Z punktu widzenia przemysłu zastosowanie technologii immersyjnych wpływa na redukcję kosztów, która wynika z wielu czynników. Jednym z nich jest zwiększenie efektywności – lepsze szkolenia, szybsze wdrożenia, większe zaangażowanie i przyswajanie wiedzy, a co za tym idzie zmniejszenie ilości błędów produkcyjnych. Kolejnym jest minimalizacja konieczności tworzenia fizycznych prototypów czy organizowania rzeczywistych eksperymentów, które można przeprowadzić w bezpiecznym wirtualnym środowisku.

Autorski projekt

Opracowano symulator szkoleniowy BHP (Bezpieczeństwo i Higiena Pracy) w technologii VR dla gogli Meta Quest 3. Środowisko odwzorowuje fragment rzeczywistej instalacji rafineryjnej na podstawie planów technicznych w celu zwiększenia realizmu (rys. 2). Modele 3D wykonano w programie Blender, a aplikację zaimplementowano w środowisku Unity 3D. Nawigacja i interakcje realizowane są z wykorzystaniem kontrolerów oraz śledzeniem dłoni. Symulator został przygotowany z myślą o rafinerii – obiekcie o krytycznym znaczeniu strategicznym, w którym ewentualne awarie mogą skutkować poważnymi stratami finansowymi oraz stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia personelu. W procesie projektowania symulatora brali udział pracownicy rafinerii. Faza przygotowawcza obejmowała konsultację, wizję lokalną na terenie rafinerii i wspólne przygotowanie scenariusza, weryfikację jego poprawności merytorycznej oraz testy.

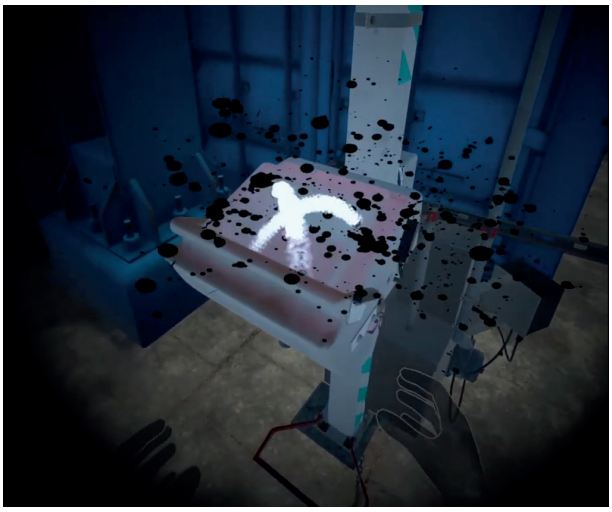
Rys. 2. Fragment wirtualnej instalacji rafineryjnej

Główny scenariusz treningowy obejmuje symulację rutynowej procedury pobrania próbki frakcji ropy naftowej z wyznaczonego punktu pomiarowego. Wskutek zasymulowanej nieszczelności instalacji strumień cieczy kieruje się na twarz użytkownika. System uruchamia dynamiczne ograniczenia pola widzenia (przyciemnienie krawędzi obrazu, zabrudzenie na wizjerze), co zwiększa realizm sytuacji zagrożenia (rys.3). Zgodnie z zasadami BHP użytkownik przerywa prowadzone czynności i kieruje się do najbliższej oczomyjki. Obsługa urządzenia odtworzona jest analogicznie do rzeczywistej instalacji (w tym sygnalizacja świetlno-dźwiękowa). Kryteria zaliczenia obejmują m.in. poprawne uruchomienie oczomyjki oraz minimalny czas płukania oczu (rys. 4).

Metodyka i ewaluacja symulatora

W celu oceny skuteczności szkolenia przewidziano pomiar następujących metryk: czas dotarcia do oczomyjki [s], kompletność kroków procedury [%], liczba

Rys. 3. Widok użytkownika podczas zdarzenia – dynamiczne ograniczenia pola widzenia i zabrudzenia na wizjerze



Rys. 4. Uruchomienie oczomyjki: strumień wody, sygnalizacja świetlno-dźwiękowa, pozycja głowy. Kryterium zaliczenia: minimalny czas płukania

błędów krytycznych [n], samoocena pewności postępowania (skala Likerta), subiektywne obciążenie (NASA-TLX) oraz akceptowalność użyteczności (SUS). Pilotaż planuje się z udziałem 20 uczestników (pracownicy BHP oraz działu utrzymania ruchu) w schemacie pre-/post-test. Dane rejestrowane są w aplikacji i raportowane w postaci zagregowanych wskaźników.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono kolejne transformacje przemysłowe i wskazano najważniejsze kierunki rozwoju w ramach Przemysłu 4.0. Jak wynika z przeprowadzonej analizy literatury oraz współpracy autorów z otoczeniem gospodarczym technologie AR, VR oraz MR będą odgrywać coraz większą rolę w różnych obszarach marketingu, szkoleń z zakresu kompetencji twardych i miękkich, a także różnych aspektów przemysłu wspierając cyfryzację, automatyzację i integrację systemów [14]. W efekcie można oczekiwać wzrostu liczby zapotrzebowania na rozwiązania zaproponowane przez autorów niniejszej pracy. Omówione rozwiązanie VR wprowadza trzy elementy innowacyjne: dynamiczną symulację ograniczenia pola widzenia podczas incydentu chemicznego, kryteria zaliczenia oparte na obiektywnie rejestrowanych zachowaniach użytkownika oraz telemetrię szkoleniową do oceny skuteczności kursu. W połączeniu z odwzorowaniem rzeczywistej geometrii fragmentu instalacji czyni to symulator narzędziem adekwatnym do środowiska pracy. Scenariusz szkoleniowy obejmuje pomiar czasu reakcji, kompletność procedur i częstość błędów krytycznych w schemacie pre-/post-test, co pozwoli na ocenę wpływu szkolenia.

Dodatkowo autorzy pracy planują prowadzić badania nad zastosowaniem i współpracą sztucznej inteligencji z omawianymi w pracy technologiami między innymi do stworzenia inteligentnego wsparcia serwisowego.

Przyjęto: 05.10.2025, **zaakceptowano:** 04.11.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] White, D. E. (2024). A Soul Imparted to Brute Matter; or, the Secret Ministry of Steam. In Romanticism, Liberal Imperialism, and Technology in Early British India: "The all-changing power of steam" (pp. 15-33). Cham: Springer Nature Switzerland.
[2] MacLeod, C. (1998). James Watt, heroic invention and the idea of the industrial revolution. In technological revolutions in europe (pp. 96-116). Edward Elgar Publishing.
[3] Przemysł 4.0 Rewolucja już tu jest. Co o niej wiesz? https://www.astor.com.pl/images/Industry_4-0_Przemysl_4-0/ASTOR_przemysl4_whitepaper.pdf,dostęp online 23.04.2025.
[4] Mokyr, J., Strotz, R. H. (1998). The second industrial revolution, 1870–1914. Storia dell'economia Mondiale, 21945(1), 219–245.
[5] Kaczmar-Kolny, E., Pośpiech, W. (2023). Analiza rozwoju technologii w kontekście przemysłu 4.0 i 5.0, Inżynieria Produkcji, 53-68.
[6] Wittbrodt, P., & Łapuńka, I. (2017). Przemysł 4.0 – wyzwanie dla współczesnych przedsiębiorstw produkcyjnych. Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, 2, 793–799.
[7] Rentafun.pl. Meta Quest 3; 2025. Available online: https://rentafun.pl/elektronika/39-okulary-vr-oculus-meta-quest-3-128-gb.html, dostęp online 11.01.2025.
[8] Fuchs, P., Moreau, G., Guitton, P., (2011) Virtual Reality: Concepts and Technologies, CRC Press
[9] Unity 3D, Unity Technologies, https://unity3d.com/, dostęp online 23.04.2025
[10] Unreal Engine, Epic Games Inc., https://www.unrealengine.com, dostęp online 23.04.2025
[11] Rauschnabel, P.A., Ro, Y.K. (2016) Augmented reality smart glasses: An investigation of technology acceptance drivers. International Journal of Technology Marketing, 11, 123–148
[12] Malta, A.; Farinha, T.; Mendes, M. (2023) Augmented Reality in Maintenance – History and Perspectives. J. Imaging, 9(7), 142.
[13] Meta Spark Blog https://spark.meta.com/blog/meta-spark-announcement/, dostęp online 23.04.2025
[14] Flavian, C., Ibanez-Sanchez, S., Orus, C., (2019). The impact of virtual, augmented and mixed reality technology on the customer experience, Journal of Business Research, 100, 547–560