

Zastosowanie techniki rzeczywistości wirtualnej do wspomaganie oceny ryzyka prowadzonej przez projektantów maszyn

Marek Dźwiarek

Wstęp

Obowiązek prowadzenia oceny ryzyka na możliwie jak najwcześniejszym etapie projektowania maszyny wynika zarówno z dobrych praktyk inżynierskich, jak i z wymogów prawnych. Dyrektywa 2006/42/WE [1] wymaga:

„Producent maszyny lub jego upoważniony przedstawiciel musi zapewnić przeprowadzenie oceny ryzyka w celu określenia wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa, które mają zastosowanie do maszyny; zatem maszyna musi być zaprojektowana i wykonana z uwzględnieniem wyników oceny ryzyka. Za pomocą iteracyjnego procesu oceny ryzyka i zmniejszania ryzyka, o którym mowa powyżej, producent lub jego upoważniony przedstawiciel:

- określa ograniczenia dotyczące maszyny, w tym zamierzonego użytkowania i możliwego do przewidzenia w uzasadniony sposób niewłaściwego jej użycia;
- określa zagrożenia, jakie może stwarzać maszyna, i związane z tym niebezpieczne sytuacje;
- szacuje ryzyko, biorąc pod uwagę ciężkość możliwych urazów lub uszczerbku na zdrowiu i prawdopodobieństwo ich wystąpienia;
- ocenia ryzyko, mając na celu ustalenie, czy wymagane jest zmniejszenie ryzyka, zgodnie z celem niniejszej dyrektywy;
- eliminuje zagrożenia lub zmniejsza ryzyko związane z takimi zagrożeniami poprzez zastosowanie środków ochronnych”.


Wymaganie to w sposób bezpośredni nakłada na producenta maszyny obowiązek przeprowadzenia oceny ryzyka.

Ogólne zasady oceny ryzyka są zawarte w normie PN-EN ISO 12100:2011 „Bezpieczeństwo maszyn. Ogólne zasady projektowania. Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka” [2]. Opisane w tej normie procedury i zasady postępowania wskazują na istotne znaczenie systematyczności prowadzenia oceny ryzyka oraz jej właściwego dokumentowania. Specyfika tych działań z natury wskazuje na zastosowanie do celów oceny ryzyka komputerowych narzędzi wspomagających jej prowadzenie. Dlatego też coraz powszechniej prowadzone są prace mające na celu opracowanie takich narzędzi. Np. w CIOP-PIB zostały opracowane i są z powodzeniem stosowane metodyki oceny ryzyka na stanowiskach pracy (np. narzędzie komputerowe pod nazwą STER). Opracowane zostały także narzędzia komputerowe wspierające prowadzenie oceny ryzyka przy projektowaniu maszyn [3].

Doświadczenia praktyczne, zdobyte przy prowadzeniu oceny ryzyka na etapie projektowania systemów wytwórczych, zapre-

Streszczenie: Zamierzeniem badań było wykorzystanie najnowocześniejszej techniki komputerowej, jaką jest technika rzeczywistości wirtualnej (VR), do usprawnienia procesu oceny ryzyka prowadzonej przez projektantów maszyn. Analizy przeprowadzone metodą przeglądu dokumentacji DI miały na celu opracowanie macierzy przyporządkowania zagrożeń do funkcji realizowanych przez konfigurację sprzętową i programową techniki rzeczywistości wirtualnej. Ostatecznej weryfikacji użyteczności techniki VR do oceny ryzyka dokonano metodą inspekcji eksperckiej i testowania przez użytkownika.

Słowa kluczowe: ocena ryzyka, rzeczywistość wirtualna, bezpieczeństwo maszyn.

 **Abstract:** The obligation to conduct risk assessment at the earliest possible stage of machinery design arises both from good engineering practices and legal requirements. The research conducted using Document Investigation an Expert Inspection method confirmed the usefulness of the VR technology for identification of mechanical hazards and for evaluating the possibility of access to particular elements of the machine. A model of anthropometric features of a human being have been very useful for The as well as for assessing obtaining the data necessary for evaluating the stress on the musculoskeletal system. Final verification of the developed method will be performed by means of the user testing (UT) method. (Application of virtual reality technology for supporting risk assessment conducted by machinery designers).

Keywords: risk assessment, virtual reality, safety of machinery

zentowane w [4] pokazały, że nawet niezbyt szczegółowe modele wirtualne zautomatyzowanych systemów wytwarzania mogą znacznie usprawnić niektóre etapy prowadzenia oceny ryzyka. Doświadczenia te potwierdziły się przy opracowaniu metody wirtualnego modelowania stref zagrożenia do wspomaganie doboru urządzeń ochronnych do maszyn [5]. Zamierzeniem badań było wykorzystanie najnowocześniejszych technik komputerowych do usprawnienia procesu oceny ryzyka prowadzonej przez projektantów maszyn.

Zastosowanie techniki rzeczywistości wirtualnej (VR) w obszarze bezpieczeństwa

Rzeczywistość wirtualna (*virtual reality* – VR) jest to obraz sztucznej rzeczywistości stworzony przy wykorzystaniu technologii informatycznej. Polega na multimedialnym kreowaniu komputerowej wizji przedmiotów, przestrzeni i zdarzeń. Może on reprezentować zarówno elementy świata realnego (symulacje komputerowe), jak i zupełnie fikcyjnego. Rzeczywistość wirtualna charakteryzowana jest w 2 aspektach:

- **Immersja** jest zdolnością komputerowo wygenerowanego środowiska do sprawienia wrażenia, że użytkownik jest częścią tego sztucznego środowiska, jest w nim „zanurzony”. Wrażenie immersji uzyskuje się co najmniej poprzez właściwe oddziaływanie na zmysł wzroku dzięki stereoskopowej projekcji dwóch różnych obrazów dla lewego i prawego oka. Różnica pomiędzy tymi obrazami polega na różnym położeniu punktu obserwacji. Obydwa są generowane w taki sposób, że punkt obserwacji każdego z nich pokrywa się z naturalnym sposobem rejestracji obrazu przez ludzkie oczy. Obrazy mogą być wyświetlane jednocześnie na dwóch wyświetlaczach, naprzemiennie na jednym bądź nałożone na siebie na tym samym wyświetlaczu. Bardziej zaawansowane systemy, które oferują lepszą jakość wynikającą z szybszego przetwarzania informacji oraz dokładniejszego odzwierciedlenia obrazu i dźwięku, generują środowisko łatwiej przyswajalne przez użytkownika. Ma to istotne znaczenie dla komfortu, ergonomii i bezpieczeństwa pracy.
- **Interakcja** jest terminem definiującym tryb pracy systemu komputerowego polegający na utrzymywaniu stałego kontaktu z użytkownikiem (poprzez wymianę informacji dotyczących położenia i zadawanych poleceń). Wymiana informacji odbywa się w sposób ciągły i ma bezpośredni wpływ na wykonywane zadania i wyświetlane informacje. W środowisku VR interakcja jest rozszerzona o informacje zwrotne z systemu, które mogą przybierać różne formy w zależności od wykonywanych zadań i wykorzystywanych urządzeń perifereryjnych.

Najważniejszymi atrybutami rzeczywistości wirtualnej, decydującymi o możliwościach zastosowań, są [6]:

- środowisko jest generowane komputerowo;
- środowisko i odczucia użytkownika są trójwymiarowe;
- użytkownik ma poczucie obecności w środowisku wirtualnym;
- użytkownik może przemieszczać się w środowisku wirtualnym;
- zachowanie się obiektów w środowisku wirtualnym odpowiada ich zachowaniu się w świecie rzeczywistym;
- występuje interakcja użytkownika i środowiska wirtualnego w czasie rzeczywistym.

Dzięki tym cechom techniki rzeczywistości wirtualnej systemy takie mogą być skuteczniejsze przy prowadzeniu analiz niż powszechnie stosowane systemy CAD/CAM. Architektura tych systemów umożliwia lepsze dopasowanie do potrzeb użytkownika. Jednocześnie VR lepiej prezentuje rzeczywiste obiekty niż systemy CAD/CAM. Cechy te uzasadniają założenie, że VR może skutecznie wspierać proces prowadzenia oceny ryzyka przez projektantów maszyn.

Aktualnie na świecie niezwykle dynamicznie rozwijają się metody zastosowań technik rzeczywistości wirtualnej (badań wykorzystujących zaawansowane metody symulacji komputerowej). Prace dotyczące zastosowań tej techniki do analiz stanu bezpieczeństwa systemów przemysłowych prowadzone są w wielu ośrodkach na świecie. W USA najbardziej zaawansowane prace takie prowadzi np. Department of Health and Human Services, Centre of Disease Control and Prevention NIOSH. Dotyczą one zastosowania wirtualnego modelowania do analiz ergonomicznych oraz oceny ryzyka na stanowiskach pracy w kopalniach. Zastosowanie tych technik do oceny ryzyka związanego z katastrofami naturalnymi zaprezentowane zostało w [7]. Kim i Gong pokazali w [8] zasady wykorzystania symulacji VR do oceny ryzyka wystąpienia kolizji w transporcie morskim. W UE w ramach 6PR zrealizowany został Projekt Zintegrowany VIRTUALIS (*Virtual Reality and Human Factors Applications for Improving Safety* [9]). W ramach tego projektu opracowywane są metody wykorzystania modelowania wirtualnego do uwzględniania czynnika ludzkiego przy projektowaniu instalacji procesowych, zwłaszcza w przemyśle chemicznym i petrochemicznym. W [10] zaprezentowano możliwości zastosowania technik VR w pracach badawczych dotyczących skuteczności sygnałów ostrzegawczych. Zastosowanie techniki rzeczywistości wirtualnej do analiz bezpieczeństwa na placu budowy oraz wspomaganie szkoleń pokazane jest w [11]. W [12] zaprezentowano koncepcję zastosowania symulatorów VR do szkolenia w aspekcie bezpieczeństwa kierowców wózków podnośnikowych, a w [13] wykorzystanie symulacji wirtualnych do doboru systemów wizyjnych do maszyn. Prowadzone są także prace dotyczące zastosowań systemów rzeczywistości wzbogaconej do zwiększenia bezpieczeństwa na stanowiskach pracy. Przykłady takich rozwiązań pokazane są w [14]. Ogólne zasady wykorzystania technik rzeczywistości wirtualnej w obszarze bezpieczeństwa pracy omówiono w [15 i 16]. Przykłady zastosowań VR w dziedzinie bezpieczeństwa i ergonomii zaprezentowano w [17]. Prace w tym zakresie prowadzone są m.in. na potrzeby elektrowni nuklearnych, gdzie systemy VR dają możliwość szkolenia personelu w sytuacjach awaryjnych. Zastosowanie technik VR wydaje się być szczególnie korzystne w sytuacjach, gdy szkolenia w warunkach rzeczywistych wiążą się z zagrożeniem zdrowia i życia człowieka. Z tego względu szkolenia w wirtualnym środowisku najczęściej związane są z dziedzinami takimi, jak medycyna (np. wirtualne operacje [18]) lub energetyka atomowa (np. ograniczenie narażenia pracownika na promieniowanie jonizujące [19]). Prowadzone są też badania z wykorzystaniem technik VR obejmujące obsługę specjalistycznych maszyn, np. w zastosowaniach górniczych [20]. Techniki VR są stosowane do analizy ergonomii pracy (np. w przypadku obsługi maszyn w kopalniach [21]) oraz identyfikacji potencjalnych zagrożeń (np. związanych z pracą w kopalni [21 i 22]). Prace te pozwoliły na rozpoznanie możliwości zastosowań technik VR w różnych aspektach analiz i zwiększania bezpieczeństwa.

Ogólna koncepcja włączenia aspektów bezpieczeństwa do projektowania urządzeń przemysłowych zaprezentowana jest w [23] i [24]. Pierwszym istotnym krokiem do zastosowania technik komputerowych do analiz bezpieczeństwa przy

projektowaniu maszyn było opracowanie systemu *Computer Aided Safety Standards Application for Design* (CASSA) [25]. Narzędzie to wspomaga projektanta maszyny w prowadzeniu analiz możliwych scenariuszy zdarzeń z uwzględnieniem aspektów bezpieczeństwa. Do tego celu zastosowano specjalne, zorientowane na użytkownika interfejsy przystosowane do prowadzenia różnego rodzaju analiz. Uwzględnia ono także różne rodzaje użytkowników, takich jak projektanci maszyn czy eksperci grup normalizacyjnych. Narzędzia te wskazują na skuteczność zastosowań modelowania 3D do oceny ryzyka na wczesnych etapach projektowania maszyn.

Wszystkie dotychczasowe prace podejmowały problem wykorzystania technik komputerowych do oceny ryzyka w aspektach szczegółowych, zazwyczaj w zakresie ergonomii stanowisk pracy. W dostępnej literaturze brak jest doniesień o próbach wykorzystania techniki rzeczywistości wirtualnej do prowadzenia oceny ryzyka wg dyrektywy maszynowej, z uwzględnieniem wszystkich jej aspektów. Proces oceny ryzyka wykonywanej przez projektanta maszyny ma inne cele i inne metody postępowania niż np. w przypadku ergonomicznej oceny stanowisk pracy w przemyśle procesowym, opisanej w [9]. Przewidziana do opracowania w ramach projektu metoda oceny ryzyka ukierunkowana będzie na usprawnienie procesu prowadzenia oceny ryzyka wymaganej w dyrektywie maszynowej, z uwzględnieniem specyfiki projektowania maszyny. Umożliwi to usystematyzowania działań związanych z oceną ryzyka. Po przez usprawnienie procesu oceny ryzyka oraz umożliwienie jej prowadzenia już na wczesnych etapach projektowania maszyn zmniejszone zostaną także koszty związane z zastosowaniem systemów ochronnych do ograniczania zagrożeń występujących przy maszynie. Podejmowany projekt dotyczący opracowania metod zastosowania systemów VR do prowadzenia oceny ryzyka przy projektowaniu maszyn jest naturalną kontynuacją doświadczeń praktycznych [4], jak i prowadzonych dotychczas prac badawczych [3, 5, 13].

Ocena ryzyka jest procesem pozwalającym na uzyskanie najistotniejszych informacji niezbędnych do podejmowania decyzji dotyczących metod zapewniania bezpieczeństwa. Jest ona procesem iteracyjnym, który powinien być wykonywany w poszczególnych etapach cyklu życia maszyny. Jej wyniki w znacznym stopniu zależą od etapu cyklu życia, na którym jest ona prowadzona. Ocena ryzyka wykonywana przez projektanta pozwala na zgromadzenie szczegółowych informacji o budowie maszyny oraz jej funkcjonowaniu oraz określenie informacji ważnych dla użytkownika.

Podstawowe zasady oceny ryzyka formułuje norma PN-EN ISO 12100:2011. Działania wykonywane w ramach oceny ryzyka obejmują kolejno:

- identyfikację maszyny;
- określenie ograniczeń dotyczących maszyny;
- identyfikację zagrożeń;
- oszacowanie ryzyka;
- określenie ryzyka resztkowego.

W przypadku niezadowolającego wyniku oszacowania ryzyka projektant zobowiązany jest do zastosowania środków jego redukcji. Z zasady redukcja ryzyka nie jest częścią procesu jego oceny, nie jest więc objęta zakresem niniejszego projektu.

Kwestie wykorzystania techniki VR w procesie redukcji ryzyka przedstawione zostały w [5].

Ocenę ryzyka należy przeprowadzać niezależnie dla każdego zidentyfikowanego zagrożenia. W przypadku różnych zagrożeń mogą być stosowane różne metody oceny ryzyka. Do oszacowania poziomu ryzyka najczęściej stosuje się następujące metody:

- macierze ryzyka;
- graf ryzyka;
- obliczenia numeryczne;
- liczbowe punktacje;
- metody jakościowe;
- listy kontrolne;
- pomiary;
- kombinacje powyższych metod.

Zazwyczaj specyfika zagrożenia decyduje o sposobie szacowania poziomu ryzyka. Dlatego też ocenę ryzyka wykonuje się w odniesieniu do każdego zagrożenia niezależnie.

Wszystkie działania związane z prowadzeniem oceny ryzyka powinny być dokumentowane. Dokumentacja oceny ryzyka powinna wskazywać zastosowaną procedurę postępowania oraz uzyskane rezultaty. Dokumentacja ta, odpowiednio do badanej maszyny, powinna zawierać:

- identyfikację maszyny;
- założenia dotyczące działania maszyny;
- opisy zidentyfikowanych zagrożeń i sytuacji zagrożenia;
- opisy środków redukcji ryzyka zastosowanych w kolejnych etapach projektowania;
- informacje o ryzyku szacunkowym;
- wyniki oceny ryzyka.

Metodyka badań

Badania realizowane w ramach projektu dotyczą określenia przydatności technik rzeczywistości wirtualnej do określonego zastosowania, jakim jest prowadzenie oceny ryzyka na etapie projektowania maszyn. W dostępnej literaturze znanych jest szereg Metod Oceny Użyteczności technik rzeczywistości wirtualnej (*Usability Evaluation Methods* – UEMs). Do najpowszechniej stosowanych należą:

- analiza dokumentacji (*Document-based Inspection* – DI);
- testowanie eksperckie (*Expert Inspection* – EI);
- testowanie przez użytkowników (*User Testing* – UT).

Ocena skuteczności tych metod przedstawiona została w [26].

DI jest metodą oceny użyteczności poprzez analizę dokumentów dotyczących wymagań, które należy spełnić, i właściwości ocenianych rozwiązań (ISO/TS 16982 [27]). Metoda DI stosowana jest w wielu odmianach (analiza poznawcza, zgodność z normami i przewodnikami, zgodność z wymaganiami ergonomicznymi [28] itp.). Skuteczność tej metody zależy od systematyki prowadzonych analiz. Istotnym jej ograniczeniem jest fakt, że może być ona stosowana jedynie do oceny już znanych rozwiązań, zgodnie z aktualnym stanem wiedzy. Ważne są także kompetencje ekspertów, którzy te metodę stosują.

EI jest popularną metodą oceny, stosowaną zwłaszcza w przemyśle. Jest to metoda nieformalna, polegająca na ocenie bazującej na doświadczeniu i wiedzy jednego lub kilku ekspertów. Eksperti diagnozują potencjalne problemy zgodnie z aktualnym stanem wiedzy i swoim doświadczeniem. Dzięki temu można

stosunkowo łatwo zidentyfikować potencjalne ograniczenia w użyteczności ocenianych rozwiązań. Ograniczeniem tej metody jest to, że pozwala ona przewidzieć jedynie znane z posiadanych doświadczeń możliwe problemy.

Najbardziej znaną metodą jest prawdopodobnie UT. Polega ona na próbach praktycznych zastosowań opracowanych rozwiązań przez ich potencjalnych końcowych odbiorców. Celem tych prób jest zebranie spontanicznych komentarzy dotyczących użyteczności proponowanych rozwiązań, a także ocena na podstawie wskaźników mierzalnych, takich jak czas realizacji zadania, dokładność uzyskanych rezultatów, liczba popełnionych błędów.

Ocena przeprowadzona w [26] pokazała, że poszczególne metody różnią się zarówno skutecznością, jak i rodzajem wykrywanych problemów. Dlatego też w w badaniach zastosowano kolejno wszystkie trzy metody.

Wstępne oceny potencjalnej użyteczności techniki VR do wspomaganie oceny ryzyka przy projektowaniu maszyn przeprowadzono na podstawie badań przeprowadzono metodą DI. W tym celu przeprowadzono próby wykonania takiej oceny z wykorzystaniem dokumentacji 3 maszyn w odniesieniu do wymagań normy PN-EN 12100:2011 [2]. Próby miały na celu zidentyfikowanie, w których etapach oceny ryzyka pomocne może być wykorzystanie techniki VR. Analizowane były różne metody oceny ryzyka związanego z różnymi zagrożeniami. W celu uzyskania większej pewności co do wyników oceny użyteczności VR analizy zostały przeprowadzone z wykorzystaniem programu PRO-M [3], co zapewniło systematyczność prowadzonych działań. Analizy wykonywane były przez ekspertów z dużym doświadczeniem w prowadzeniu oceny ryzyka związanego z użytkowaniem maszyn, a także ze znajomością techniki VR [4, 5, 12]. Wyniki przeprowadzonych analiz stanowiły podstawę do opracowania projektu metody wykorzystania techniki VR do wspomaganie prowadzenia oceny ryzyka przez projektantów maszyn.

Na następnym etapie przeprowadzono analizy metodą EI. W tym celu zbudowano wirtualne modele trzech maszyn. Zespół ekspertów przeprowadził próby oceny ryzyka związanego z ich obsługą. Celem tych prób było zidentyfikowanie ewentualnych problemów z użytecznością proponowanych metod oraz propozycje ich wyeliminowania.

Ostateczną weryfikację opracowanej metody wykonano metodą UT. Opracowana metoda zaprezentowana została projektantom maszyn, którzy przeprowadzili próby jej zastosowania do aktualnie projektowanych maszyn. Następnie dokonali oni oceny użyteczności proponowanej metody.

Wyniki badań

Badania rozpoczęto od analizy metod oceny ryzyka stosowanych przez producentów maszyn w aspekcie możliwości wykorzystania technik rzeczywistości wirtualnej. Analizy przeprowadzone metodą przeglądu dokumentacji (*Document Inspection* – DI) miały na celu opracowanie macierzy przyporządkowania zagrożeń do funkcji realizowanych przez, w miarę możliwości prostą, konfigurację sprzętową i programową techniki rzeczywistości wirtualnej, w procesie oceny ryzyka prowadzonej przez projektantów maszyn.

Badania polegały na przeprowadzeniu prób oceny ryzyka z wykorzystaniem dokumentacji 3 maszyn w odniesieniu do wymagań normy EN ISO 12100:2011 [2]. Analizowane były różne metody oceny ryzyka związanego z różnymi zagrożeniami. W celu uzyskania większej pewności co do wyników oceny użyteczności VR analizy przeprowadzono z wykorzystaniem programu PRO-M (Dźwiarek 2008), co zapewniło systematyczność prowadzonych działań. Analizy wykonywane były przez ekspertów z dużym doświadczeniem w prowadzeniu oceny ryzyka związanego z użytkowaniem maszyn [3], a także ze znajomością techniki VR ([4] i [5]).

W celu doboru maszyn, których dokumentacja była analizowana, dokonano wstępnego przeglądu ponad 150 różnych maszyn zaprojektowanych i zbudowanych w ostatnich latach. Były to głównie:

- wielostanowiskowe linie montażowe i produkcyjne;
- automatyczne linie montażowe;
- testery kontroli ostatecznej wyrobów;
- maszyny i urządzenia do produkcji opakowań foliowych;
- automatyczne linie do opakowań;
- maszyny do automatyzacji podawania itp.

Spośród nich wstępnie wyselekcjonowano 12 maszyn do dalszej analizy. Były to:

- stanowisko montażowe podnośników do szyb;
- formatyzerka do szprosów;
- automatyczna prasa montażowa do łożysk;
- stanowisko z obrotowym stołem montażowym;
- linia montażowa do zacisków;
- tester kontroli końcowej;
- automat odcinający konektory;
- automat do montażu szczotkotrzymaczy;
- urządzenie kontrolne tulei;
- automat do montażu nypli;
- stanowisko badania szczelności;
- automatyczny podajnik szprych.

Maszyny te zostały przeanalizowane w aspekcie występujących zagrożeń i ich przydatności do analiz metod oceny ryzyka. Ostatecznie do dalszych badań wybrane zostały następujące maszyny:

- automat do montażu nypli;
- stanowisko badania szczelności pomp;
- automatyczny podajnik szprych.

Przeprowadzone analizy dotyczyły użyteczności techniki VR przy prowadzeniu oceny ryzyka związanego z zagrożeniami:

- mechaniczne;
- elektryczne;
- termiczne;
- hałasem;
- drganiami mechanicznymi;
- promieniowaniem;
- substancjami i materiałami niebezpiecznymi;
- wybuchem;
- ergonomiczne;
- związane z niesprawnością systemu sterowania;
- związane z ergonomią;
- związane ze środowiskiem, do którego maszyna jest przeznaczona.

Tabela 1. Macierz przyporządkowania użyteczności techniki VR do zagrożeń w poszczególnych etapach oceny ryzyka

Zagrożenie	Metoda oceny ryzyka	Etap oceny i redukcji ryzyka				
		Opis ograniczeń dotyczących maszyny	Identyfikacja zagrożeń	Szacowanie ryzyka	Redukcja ryzyka	Określenie ryzyka resztkowego
Mechaniczne	hybrydowa	BU	BU	BU	BU	BU
Elektryczne	listy kontrolne	U	U	U	MU	MU
Termiczne	pomiary	MU	MU	MU	MU	MU
Hałasem	pomiary	MU	MU	MU	MU	MU
Drganiami mechanicznymi	pomiary	MU	MU	MU	MU	MU
Promieniowaniem	pomiar	MU	MU	MU	MU	MU
Substancjami i materiałami niebezpiecznymi	pomiary	MU	MU	MU	MU	MU
Wybuchem	analiza materiałów	MU	MU	MU	MU	MU
Związane z niesprawnością systemu sterowania	graf ryzyka	BU	BU	U	BU	MU
Związane z ergonomią	obliczenia wskaźników ryzyka	BU	BU	BU	BU	BU
Związane ze środowiskiem, do którego maszyna jest przeznaczona	graf ryzyka	MU	MU	MU	MU	MU

BU - bardzo użyteczna; U - użyteczna; MU - mało użyteczna

Analizowane były następujące metody oceny ryzyka:

- graf ryzyka;
- listy kontrolne;
- obliczeń wskaźników ryzyka;
- hybrydowa;
- pomiary czynników ryzyka.

Eksperti prowadzący ocenę ryzyka na poszczególnych jej etapach analizowali cechy techniki VR w aspekcie jej użyteczności w prowadzonych działaniach. W efekcie ustalono, że zastosowanie techniki VR może znaleźć istotne uzasadnienie. Technika VR jest szczególnie przydatna przy określaniu ograniczeń dotyczących maszyny oraz identyfikacji zagrożeń i stref zagrożenia. Dotyczy to zwłaszcza zagrożeń mechanicznych, ergonomicznych i związanych z niesprawnością systemów sterowania. W tym ostatnim przypadku technika VR może być przydatna przy określaniu wymagań funkcjonalnych dotyczących poszczególnych funkcji bezpieczeństwa, a raczej nie będzie użyteczna w procesie określania wymagań dotyczących odporności na defekty oraz przy ocenie osiągniętych poziomów *Safety Integrity Level (SIL)* i *Performance Level (PL)*.

Technika VR nieco mniej przydatna będzie w procesie szacowania ryzyka, aczkolwiek w niektórych przypadkach analizy wykazały, że może ona wspomóc projektanta także w tych działaniach.

Analizy wykazały natomiast, że technika VR w niewielkim stopniu może być użyteczna, gdy ocena ryzyka prowadzona jest metodą pomiarów parametrów maszyny i porównania ich wyników z wartościami kryterialnymi. Dotyczy to takich zagrożeń, jak:

- hałasem;
- drganiami;
- pyłami;
- niebezpiecznymi substancjami;
- promieniowaniem itp.

W tabeli 1 pokazano macierz przyporządkowania użyteczności techniki VR do zagrożeń.

Analizy przykładu maszyny nieukończonyj pokazały, że technika VR może być szczególnie użyteczna przy identyfikacji ryzyka, które nie mogło być zredukowane przez jej producenta, gdyż zależne jest od konstrukcji maszyny końcowej.

Kolejnym działaniem było opracowanie metody oceny ryzyka z wykorzystaniem technik rzeczywistości wirtualnej. Badania prowadzone były metodą testowania eksperckiego (*Expert Inspection – EI*). Badania przeprowadzono z wykorzystaniem modeli 3 maszyn wykonanych w technice VR. Zespół ekspertów przeprowadził próby oceny ryzyka związanego z ich obsługą. Celem tych prób było zidentyfikowanie ewentualnych problemów z użytecznością proponowanych metod oraz propozycje ich wyeliminowania.

Do prezentacji środowiska wirtualnego wykorzystano bibliotekę OGRE3D (ang. *Object-Oriented Graphics Rendering Engine*; www.ogre3d.org). Do detekcji kolizji i symulacji fizyki wykorzystano popularny silnik Bullet. Badania były prowadzone głównie w z wykorzystaniem techniki projekcyjnej. Próby prowadzono zarówno z wykorzystaniem komputera typu laptop, jak i projekcji wielkoekranowej za pomocą rzutnika 3D.

Do prowadzenia oceny ryzyka w technice projekcyjnej wykorzystany został model cech antropometrycznych człowieka, przygotowany przez CIOP-PIB. Model ten został zmodyfikowany poprzez wprowadzenie funkcji umożliwiających symulację pracy i zebranie danych niezbędnych do wykonania oceny obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego.

Przeprowadzono także próby wykorzystania techniki zanurzeniowej, z wykorzystaniem wizyjnego systemu śledzenia, inforękawic i HMD.

Następnie opracowano metodę tworzenia modeli VR maszyn na podstawie ich dokumentacji CAD3D. W metodzie tej wykorzystywane jest ogólnodostępne oprogramowanie FreeCAD,

MeshLab, Blender3D i TrollViewer, które udostępnione jest bez ponoszenia kosztów licencji. Metodę tę wykorzystano do zbudowania modeli VR 3 maszyn:

- testera podnośników do szyb samochodowych;
- systemu transportowego panewek (maszyna nieukończona);
- automatu do regeneracji kartridży.

Przeprowadzone badania wykazały, że do wspomagania oceny ryzyka prowadzonej przez projektantów maszyn najdogodniejszy jest system projekcyjny VR, zwłaszcza z wykorzystaniem komputera typu laptop. Natomiast system zanurzeniowy okazał się mało przydatny.

Opracowana metoda wykorzystania systemu projekcyjnego, wraz ze zmodyfikowanym modelem człowieka, szczególnie przydatna jest przy określaniu ograniczeń dotyczących maszyny w zakresie określenia obszarów dostępu niezbędnych do obsługi, konserwacji i napraw maszyny. Szczególnie przydatna jest natomiast przy analizowaniu spełnienia wymagań ergonomii, w zakresie:

- sprawdzenia dostępu do obszarów pracy, obszarów konserwacji oraz elementów sterowniczych;
- pozyskania danych niezbędnych do oceny obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego;
- może mieć także zastosowanie do weryfikacji skuteczności redukcji ryzyka związanego z zagrożeniami mechanicznymi, ale w tym przypadku bardziej odpowiednie jest zastosowanie metody modelowania stref zagrożenia i stref dostępnych, opisanej w [5].

Ostateczna weryfikacja opracowanej metody wykonana została metodą testów przez użytkownika (*user testing* – UT). Opracowana metoda zaprezentowana została projektantom maszyn, którzy przeprowadzili próby jej zastosowania do aktualnie projektowanych maszyn. Następnie dokonali oni oceny użyteczności proponowanej metody, także w aspekcie jej dostosowania do istniejącej organizacji biura inżynierskiego i konstrukcyjne w przedsiębiorstwach produkujących maszyny.

Podsumowanie. Wnioski

Ocena ryzyka powinna być prowadzona zgodnie z normą PN-EN ISO 12100:2011 i według metod zalecanych w tej normie. Zastosowanie techniki VR ma na celu ułatwienie postępowania przy ocenie ryzyka, a także umożliwienie zebrania danych niezbędnych do tej oceny. Jak wynika z przeprowadzonych badań, do wspomagania oceny ryzyka szczególnie pomocny jest model cech antropometrycznych człowieka wraz z opracowaną metodą wyznaczania parametrów niezbędnych do oceny obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego. Dostosowanie opracowanego modelu do norm zharmonizowanych z dyrektywą 2006/42/WE umożliwia wykorzystanie go w procesie oceny zgodności maszyn, co może być trudne przy wykorzystaniu innych dostępnych modeli, które ukierunkowane są na ocenę stanowiska pracy, którego częścią jest maszyna.

Badania metodą UT potwierdziły także wnioski z analiz metodami DI oraz EI, wskazujące na przydatność techniki VR do identyfikacji zagrożeń mechanicznych oraz oceny możliwości dostępu do poszczególnych elementów maszyny.

Zaproponowana metoda tworzenia symulacji VR ukierunkowana była na taki dobór narzędzi informatycznych, aby nie wy-

magaly one ponoszenia dużych kosztów ich zakupu. Zwrócono także uwagę na zapisy licencyjne. Wszystkie wykorzystywane programy przeanalizowano pod kątem ochrony własności intelektualnej i wybrano tylko takie, które nie zawierały zapisów ograniczających możliwość ich profesjonalnego zastosowania.

Odrębną kwestią był problem integracji różnych środowisk programowych. Jak pokazano na przykładach trzech maszyn, przetransferowanie danych z programu CAD wymaga co prawda pewnego nakładu pracy, ale przy zastosowaniu proponowanego oprogramowania jest to stosunkowo proste. Także opracowany model cech antropometrycznych człowieka jest przystosowany do odczytania przez program prezentacji środowiska VR. Niestety, program PRO-M nie jest wyposażony w interfejs umożliwiający odczytywanie plików tekstowych generowanych przez program VR. Ale wprowadzenie odczytanych danych bezpośrednio do programu PRO-M jest bardzo proste. Ponadto program PRO-M został zastosowany jako przykład postępowania. Każdy projektant maszyny może oczywiście zastosować inne metody prowadzenia oceny ryzyka, np. wypełnienie formularzy firmowych opracowanych w tym celu.


Podziękowania

Publikacja przygotowana na podstawie wyników badań prowadzonych w ramach II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, dofinansowanego w latach 2011–2013 w zakresie projektów badawczych rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Literatura

- [1] Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC, O.J. L 157, 09.06.2006, pp. 24–86.
- [2] ISO 12100:2010 Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction. International Standards Organisation.
- [3] DŹWIAREK M.: *Supporting tools for risk assessment during the machine design process*. „Journal of KONBIN” 3(6)/2008, pp. 199–212.
- [4] DŹWIAREK M.: *Case study of conformity assessment of automated production line*. „Pomiary Automatyka Robotyka” 10/2009, s. 38–44.
- [5] DŹWIAREK M., DYBAŁA B., JANKOWSKI J., BĘDZA T.: *A method for virtual modeling of a hazard zones to support the application of safety devices at the machinery and manufacturing systems design*. „Mechanik” 7/2010, s. 501–508.
- [6] WILSON J.R., BROWN D.J., COBB S.V., D’CRUZ M.D., EASTGATE R.M.: *Manufacturing operations in virtual environments*. „Presence, Teleoperators and Virtual Environments”, 4/1995, pp. 306–317.
- [7] INDIRLI M.: *Overview on risk assessment approaches for natural hazards*. Cost action. C26 – Urban Habitat Constructions Under Catastrophic Events, Praha, 30–31.03.2007.
- [8] KIM H., GONG I.: *Building geographic database for maritime traffic safety assessment*. Tenth International Conference for Spatial Data Infrastructure GSDI-10 St. Augustine, Trinidad, 25–29.02.2008.

- [9] COLOMBO S., BIARDI G., DE MICHELA M.: *The systematic integration of Human & Organisational Factors into safety analyses: An integrated engineering approach* [in:] Soares C.G., Zio E. (ED.): *Safety and Reliability for Managing Risk*. Taylor & Francis Group, pp. 293–308, London 2006.
- [10] DUARTE E., REBELO F., WOGALTER. M.S.: *Virtual reality and its potential for evaluating warning compliance*. „Human Factors And Ergonomics In Manufacturing & Service Industries”. Volume 20, Issue 6, 2010, pp. 526–537.
- [11] HAIYAN XIE M., TUDOREANU E., SHI W.: *Development of a virtual reality safety-training system for construction workers*. 6th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, 3–4.08.2006, Orlando, Florida, USA.
- [12] DŹWIAREK M., SAULEWICZ A., KALWASIŃSKI D.: *Investigation of appropriateness of the ve for training purposes using fork-lift vr simulator*. Proceedings of HCI International 2007, Springer, pp. 815–819, 22–27.07.2007, Beijing, China.
- [13] GRABOWSKI A., KOSIŃSKI R., DŹWIAREK M.: *Vision safety system based on cellular neural networks*. „Machine Vision and Applications”, 2010.
- [14] DŹWIAREK M., LUCZAK A., NAJMIEC A., RZYMKOWSKI C., STRAWIŃSKI T.: *Assessment of perception of visual warning signals generated using an augmented reality system*. „Lecture Notes in Computer Science LNCS” 4551, pp. 579–586. 2007.
- [15] HUELKE M., NICKEL P., LUNGFIEL A., NISCHALKE-FEHN G., SCHAEFER M.: *Cave automatic virtual environments for research into occupational safety and health – Practical recommendations and solutions for the construction*. International Conference Safety of Industrial Automated Systems, Tampere, Finlandia, 14–15 czerwiec 2010.
- [16] NICKEL P., LUNGFIEL A., NISCHALKE-FEHN G., PAPPACHAN P., HUELKE M., SCHAEFER M.: *Evaluation of virtual reality for usability studies in occupational safety and health*. International Conference Safety of Industrial Automated Systems, Tampere, Finlandia, 14–15 czerwiec 2010.
- [17] NIVOLIANITOU Z., ANEZIRIS O. N., NASIOS K.: *Virtual Reality applications for improving safety in the process industry* [in:] Soares C.G., Zio E. (ED.): *Safety and Reliability for Managing Risk*, Taylor & Francis Group, London 2006.
- [18] GALLAGHER A.G., CATES C.: *Virtual reality training for the operating room and cardiac catheterisation laboratory*. „The Lancet” Volume 364, Issue 9444, October 2004, pp. 1538–1540.
- [19] MÓL A.C.A., JORGEA C.A.F., COUTO P.M., AUGUSTO A.S.C., CUNHAC G.G., LANDAU L.: *Virtual environments simulation for dose assessment in nuclear plants*. „Progress in Nuclear Energy” 2008.
- [20] AMBROSE D.H., BARTELS J.R., KWITOWSKI A.J., HELIŃSKI R.F., GALLAGHER S., MCWILLIAMS L.J., BATTENHOUSE T.R.JR.: *Mining roof bolting machine safety: a study of the drill boom vertical velocity*. „Information Circular” 9477/2005.
- [21] FOSTER P., BURTON A.: *Virtual reality in improving mining ergonomics, application of computers and operations research in the minerals industries (APCOM)*. South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003.
- [22] ZHANG RUI-XIN, YU A DONG-FANG, LIA XIN-WANG, YA XIN-GANG, LIU YU: *Surface mine system simulation and safety risk management*. „Journal of China University of Mining and Technology” Volume 16, Issue 4, December 2006, pp. 413–415.
- [23] HASAN R., BERNARD A., CICCOTELLI J., MARTINC, P.: *Integrating safety into the design process: elements and concepts relative to the working situation*. „Safety Science” No. 41 Issue 2–3, pp. 155–179, 2003.
- [24] POHJOLA V.J.: *Fundamentals of safety conscious process design*. „Safety Science” No. 41 Issue 2–3, pp. 181–218, 2003.
- [25] BLAISE J-C., LHOSTE P., CICCOTELLI J.: *Formalisation of normative knowledge for safe design*. „Safety Science” No. 41 Issue 2–3, pp. 241–261, 2003.
- [26] BACH C., SCAPIN D.L.: *Comparing inspections and user testing for the evaluation of virtual environments*. „Intl. Journal Of Human-Computer Interaction” 26(8)/2010, pp. 786–824.
- [27] ISO/TS 16982:2000. Ergonomics of Human-System Interaction. Usability methods supporting Human Centred Design. International Standards Organisation.
- [28] SCAPIN D.L., BASTIEN J.M.C.: *Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems*. „Behaviour & Information Technology” 16/ 1997, 220–231.

 **dr hab. inż. Marek Dźwiarek** – prof. CIOP-PIB, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, e-mail: madzw@ciop.pl