

OPTYMALIZACJA MODELU STANOWISKA PRACY Z WYKORZYSTANIEM INŻYNIERII ODWROTNEJ (RE)

Bartłomiej BĘDKOWSKI*, Jerzy MADEJ**

*Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice

**Katedra Podstaw Budowy Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna,
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

b.bedkowski@komel.katowice.pl, juma@ath.bielsko.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono proces tworzenia cyfrowego modelu rzeczywistego stanowiska pracy. Proces ten oparto o technologię Inżynierii Odwrotnej. Rzeczywiste stanowisko poddano wielkoformatowemu skanowaniu za pomocą specjalnego skanera. W oparciu o uzyskaną w procesie skanowania „chmurę” punktów opracowano przestrzenny model cyfrowy, odzwierciedlający dokładnie istniejące miejsce pracy. Model ten poddano modyfikacji i analizie ergonomicznej w programie CATIA uzyskując najbardziej optymalny wariant stanowiska.

1. WPROWADZENIE

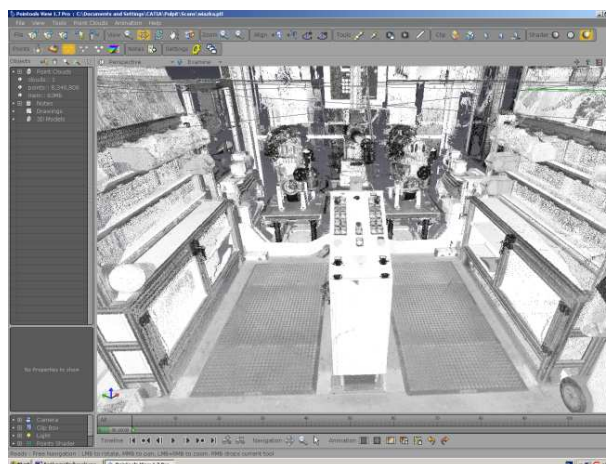
W niniejszym artykule przedstawiono możliwości w zakresie optymalizacji istniejących stanowisk pracy przy zastosowaniu Inżynierii Odwrotnej. Ponieważ odpowiednio stworzone stanowisko poprawia komfort, bezpieczeństwo oraz wydajność pracy opracowano już wiele technik i narzędzi do ergonomicznego projektowania stanowisk pracy. W wielu pracach przedstawiono techniki oparte o bazy danych antropometrycznych (wykorzystujące graniczne wymiary ciała użytkowników do określenia niezbędnej przestrzeni roboczej), makietowanie, programy komputerowe typu CAD (wykorzystujące cyfrowe modele człowieka), programy komputerowe tworzące projekty w przestrzeni wirtualnej (Clark i Corlett, 1984; Garnik, 2000; Mast i Berg, 1997; Myrcha i inni, 2004). W pracy (Liptak i Matuszek, 2009) przedstawiono możliwości modułów programu CATIA specjalizujących się w analizie ergonomicznej, wykorzystanych również w tym artykule. Inżynieria Odwrotna stanowi doskonałe narzędzie umożliwiające wejście do systemu CAD. Stosowana dotychczas głównie w celu doskonalenia konstrukcji poprzez digitalizację powierzchni odpowiednio przygotowanego modelu rzeczywistego. Opracowanie na jej podstawie cyfrowego modelu bryłowego i dowolnej jego modyfikacji (Cała, 2005; Wyleżał, 2006). Coraz częściej znajduje też zastosowanie do przygotowania i przyspieszenia procesu produkcji. Bywa też używana do optymalizacji istniejących stanowisk pracy w oparciu o wielkoformatowe skanowanie przestrzeni skanerem 3D (Matuszek i inni, 2009).

Na podstawie danych uzyskanych za pośrednictwem skanera przestrzennego w postaci „chmury” punktów utworzono w przestrzeni trójwymiarowej cyfrowy model istniejącego stanowiska roboczego do montażu wiązki elektrycznej silnika spalinowego w przedsiębiorstwie certyfikowanym pod względem zgodności z normami jakości, ochrony środowiska i bezpieczeństwa pracy (ISO TS 16949, ISO 14001 i PN-N-18801). Następnie przy użyciu programu

CATIA model ten poddano analizie i modyfikacjom, zmierzającym do uzyskania stanowiska optymalnego pod względem ergonomii. Usprawnione stanowisko poddano analizie statycznej i ocenie punktowej w celu zweryfikowania przydatności wprowadzonych zmian.

2. MODELOWANIE STANOWISKA

W badaniach został użyty skaner FARO LS 880. Skaner ten charakteryzuje się bardzo dużym zakresem skanowania – 360° w poziomie oraz 320° w pionie. Długość fali promienia lasera wynosi 785 nm. Pomiar odległości oparty jest o przesunięcie fazowe. Częstotliwość ta pozwala na relatywnie krótki czas skanowania, który w typowych zastosowaniach niewymagających stosowania pełnej rozdzielczości, wynosi około 7 minut. Wiązka lasera załamywana jest na obracającym się lustrze i omiata otoczenie, następnie po odbiciu od przedmiotu wraca do odbiornika i na tej podstawie wyznaczane jest położenie punktu w przestrzeni (współrzędne XYZ).



Rys. 1. Stanowisko otrzymane w wyniku skanowania

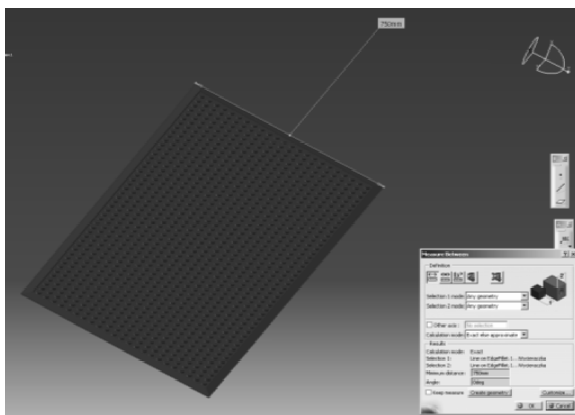
Podczas akwizycji danych zeskanowano całą powierzchnię hali produkcyjnej. Skany przeprowadzono w kilku punktach hali, następnie zaimportowano zeskanowane „chmury” punktów do programu *Pointools View Pro*, który umożliwia operowanie bardzo dużymi „chmurami” punktów. Połączenie skanów było możliwe dzięki zastosowaniu kul referencyjnych widocznych np. na regale na Rys. 1. Ostatecznie akwizycja i obróbka danych doprowadziła do wydzielenia jednego rzeczywistego stanowiska (Rys. 1) i zamodelowania jego cyfrowego odpowiednika



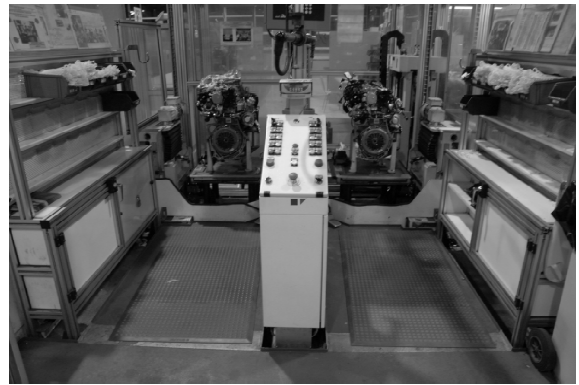
Rys. 2. Pomiary w programie *Pointools View Pro*

Modelowanie stanowiska przebiegało następująco. W pierwszej fazie dokonywano pomiarów na „chmurze” punktów poszczególnych elementów składowych stanowiska. Na Rys. 2 przedstawiono przykład pomiaru wycieraczki w programie *Pointools View Pro*. W kolejnym etapie, w programie do modelowania bryłowego *CATIA*, zgodnie ze zmierzonymi wymiarami, tworzono cyfrowe odpowiedniki elementów stanowiska. Rys. 3 przedstawia zamodelowaną zgodnie z wymiarami uzyskanymi z „chmury” punktów wycieraczkę. Po takim zamodelowaniu wszystkich elementów dokonano ich złożenia i utworzono kompletny model stanowiska.

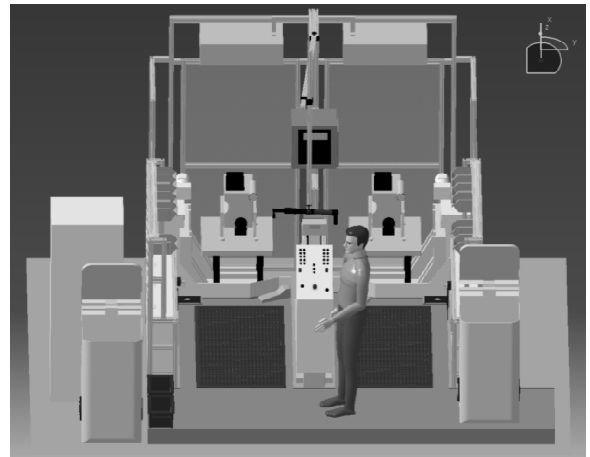
Przybliżone wcześniej etapy i ich efekty przedstawiają Rys. 1 – 3 i 5. Na Rys. 4 pokazano zdjęcie rzeczywistego stanowiska wybranego do badań. Rys. 1 przedstawia już obrobioną „chmurę” punktów powstałą w wyniku skanowania tego stanowiska. Rys. 2 – 3 zawierają etap pomiarów i modelowania. Natomiast rysunek 5 zawiera opracowany cyfrowy model w programie *CATIA*.



Rys. 3. Model wycieraczki wykonany w programie *CATIA*



Rys. 4. Zdjęcie rzeczywistego stanowiska



Rys. 5. Model stanowiska wykonany w programie *CATIA*

3. ANALIZA FUNKCJONOWANIA I PROJEKT USPRAWNINIENIA STANOWISKA PRACY Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU *CATIA*

3.1. Analiza funkcjonowania stanowiska pracy

Na zamodelowanym stanowisku pracy prowadzony jest montaż wiązki elektrycznej silnika spalinowego. Za pomocą linii transportowej silnik wraz z zapakowaną wiązką jest dostarczany na stanowisko, na którym pracownik rozpakowuje leżącą na silniku wiązkę, wyrzuca folię do stojącego na stanowisku kosza i układa wiązkę na silniku. W celu ułatwienia montażu silnik umieszczony jest na obrotowej platformie sterowanej przez pracownika. Wiązka jest montowana do silnika najpierw za pomocą wkrętaka ręcznego i dokręcana za pomocą elektrycznego wkrętaka umieszczonego na ruchomym ramieniu a w końcowej fazie jest spinana zaciskowymi opaskami. Opaski są pobierane przez pracownika ze skrzynek umiejscowionych na regale i skrzyń leżących na podłodze. Po ukończeniu montażu jednego silnika pracownik przechodzi na drugą stronę stanowiska i przeprowadza ponownie montaż na drugim silniku. Wykonywane przez pracownika czynności są cykliczne i nawet najdrobniejsza poprawa organizacji stanowiska pracy ma ogromny wpływ na cały przebieg jego pracy i samopoczucie fizyczne, dlatego zdecydowano się na przeprowadzenie analizy jego funkcjonowania.

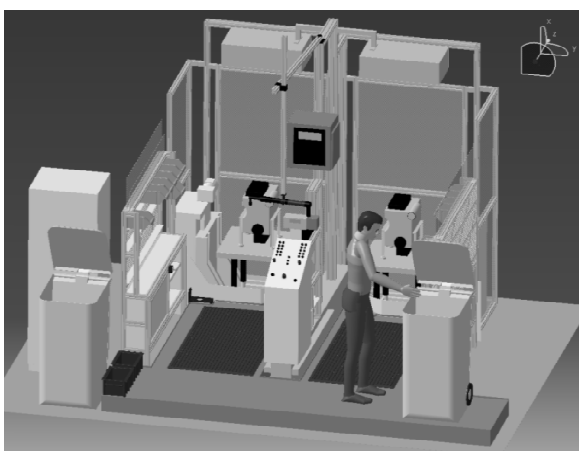
3.2. Propozycje usprawnienia istniejącego stanowiska pracy

Analiza stanowiska pracy pozwala stwierdzić, że najczęściej czasu pracownikowi poruszanie się po stanowisku w celu wyrzucenia folii, w której zapakowane są wiązki oraz pobór opasek zaciskowych znajdujących się w skrzynkach, stąd propozycje zmian dotyczą głównie zapewnienia optymalnego dostępu do wykorzystywanych podczas montażu elementów. Zaproponowano, zatem wprowadzenie usprawnień polegających na przesunięciu kosza, przesunięciu skrzynek na środkową półkę regału i przełożeniu skrzyń, leżących wcześniej na podłodze na stół.

Analiza proponowanych usprawnień została przeprowadzona z wykorzystaniem modułu do analizy ergonomicznej *Ergonomics Design&Analysis* programu *CATIA*, w oparciu o utworzony wirtualny model pracownika i ocenę jego obciążenia podczas wykonywania pracy przed i po modyfikacji. Model pracownika utworzony w module *Human Measurements Editor* programu *CATIA* zakłada, że na stanowisku pracują wyłącznie mężczyźni, gdyż ułożenie sztywnej wiązki wymaga użycia dość dużej siły fizycznej. Charakterystyczne dane fizyczne pracownika wygenerowane zostały w oparciu o 50 – percentyl. Po utworzeniu modelu pracownika i określeniu jego cech motorycznych, została przeprowadzona analiza punktowa postawy pracownika podczas wykonywania pracy przy elementach stanowiska, które zostaną poddane modyfikacji. Dzięki temu można dokonać oceny stopnia przydatności danego usprawnienia, w oparciu o porównanie wyników analizy punktowej postawy pracownika przed i po modyfikacji oraz podjąć decyzję o wprowadzeniu danej zmiany.

3.3. Analiza ustawień początkowych

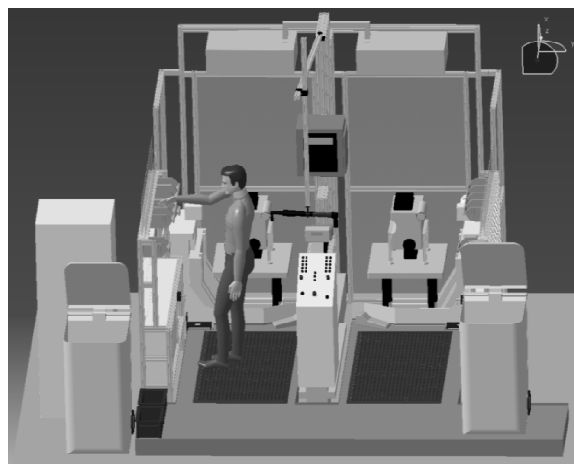
Na wstępie, przed wprowadzeniem zmian, poddano punktowej analizie statycznej pozycję pracownika podczas wyrzucania folii do kosza (Rys. 6 – 7) i podczas pobierania materiału ze skrzynek (Rys. 8 – 9), oraz (Rys. 10 – 11).



Rys. 6. Pozycja pracownika przy koszu przed usprawnieniem stanowiska

Display		Hand filter	
<input checked="" type="radio"/> List	<input type="radio"/> Chart	<input checked="" type="radio"/> Whole Hand	<input type="radio"/> Separat
Segments	Side	Result (%)	
All (all DOF)		96,4	
All		96,4	
Selected			
Favorite			
Other			
Lumbar (Spine)		100,0	
Thoracic (Spine)		98,6	
Neck		100,0	
Thigh	L	100,0	
	R	100,0	
Leg	L	100,0	
	R	100,0	
Foot	L	100,0	
	R	100,0	
Clavicular	L	100,0	
	R	57,1	
Arm	L	100,0	
	R	100,0	
ForeArm	L	99,9	
	R	91,2	
Whole Hand	L	100,0	
	R	80,8	

Rys. 7. Raport (średni) - analiza punktowa pozycji pracownika przy koszu przed usprawnieniem stanowiska



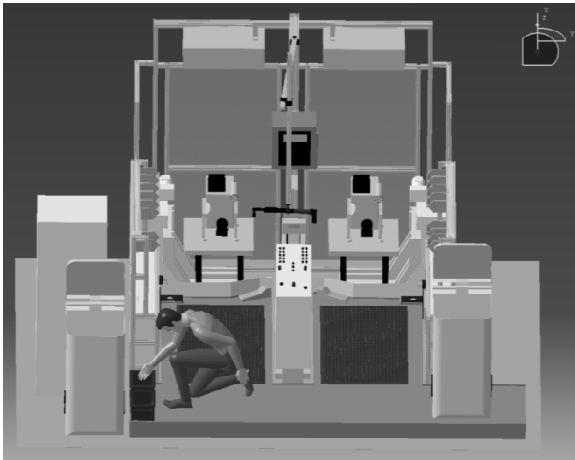
Rys. 8. Pozycja pracownika przy skrzynkach przed usprawnieniem stanowiska

Display		Hand filter	
<input checked="" type="radio"/> List	<input type="radio"/> Chart	<input checked="" type="radio"/> Whole Hand	<input type="radio"/> Separat
Segments	Side	Result (%)	
All (all DOF)		96,2	
All		96,2	
Selected			
Favorite			
Other			
Lumbar (Spine)		100,0	
Thoracic (Spine)		98,6	
Neck		100,0	
Thigh	L	100,0	
	R	100,0	
Leg	L	100,0	
	R	100,0	
Foot	L	100,0	
	R	100,0	
Clavicular	L	100,0	
	R	57,1	
Arm	L	100,0	
	R	97,5	
ForeArm	L	99,9	
	R	91,2	
Whole Hand	L	100,0	
	R	80,8	

Rys. 9. Raport (średni) – analiza punktowa pozycji pracownika przy skrzynkach przed usprawnieniem stanowiska

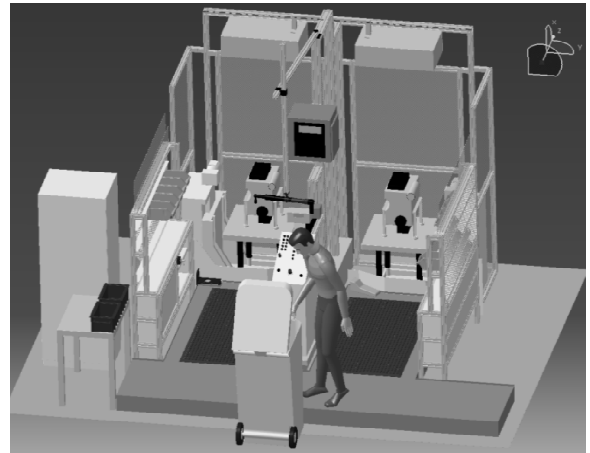
Szczegółowe raporty analiz wykonanych dla poszczególnych czynności wskazują dokładnie na miejsca największe

szezo obciążenia biomechanicznego pracownika, którym odpowiada najniższy wynik procentowy. Na ich podstawie można zaproponować usprawnienia zmniejszające obciążenie pracownika podczas wykonywanej czynności poprawiając komfort i wydajność jego pracy.



Rys. 10. Pozycja pracownika przy skrzyniach ustawionych na podłodze przed usprawnieniem stanowiska

pracy ma usytuowanie skrzynek na niższej półce, co potwierdza wynik analizy 97,6% po modyfikacji w stosunku do 96,2% przed modyfikacją.



Rys. 12. Pozycja pracownika przy koszu po usprawnieniu stanowiska

Display		Hand filter	
<input checked="" type="radio"/> List	<input type="radio"/> Chart	<input checked="" type="radio"/> Whole Hand	<input type="radio"/> Separat
Segments	Side	Result (%)	
All (all DOF)		85,6	
All		85,6	
Selected			
Favorite			
Other			
Lumbar (Spine)		66,7	
Thoracic (Spine)		66,7	
Neck		98,4	
Thigh	L	77,8	
	R	97,6	
Leg	L	68,4	
	R	58,3	
Foot	L	86,2	
	R	100,0	
Clavicular	L	100,0	
	R	94,8	
Arm	L	100,0	
	R	78,1	
ForeArm	L	89,6	
	R	99,2	
Whole Hand	L	100,0	
	R	80,8	

Rys. 11. Raport (średni) - analiza punktowa pozycji pracownika przy skrzyniach ustawionych na podłodze przed usprawnieniem stanowiska

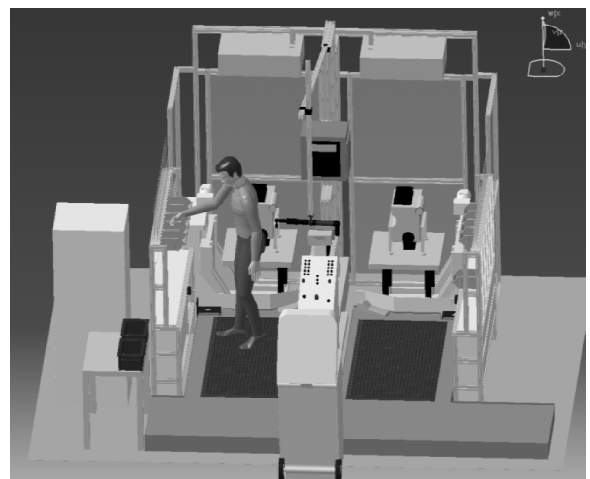
Display		Hand filter	
<input checked="" type="radio"/> List	<input type="radio"/> Chart	<input checked="" type="radio"/> Whole Hand	<input type="radio"/> Separat
Segments	Side	Result (%)	
All (all DOF)		97,8	
All		97,8	
Selected			
Favorite			
Other			
Lumbar (Spine)		96,7	
Thoracic (Spine)		97,9	
Neck		99,6	
Thigh	L	100,0	
	R	100,0	
Leg	L	100,0	
	R	100,0	
Foot	L	100,0	
	R	100,0	
Clavicular	L	100,0	
	R	100,0	
Arm	L	100,0	
	R	95,2	
ForeArm	L	100,0	
	R	78,6	
Whole Hand	L	100,0	
	R	91,4	

Rys. 13. Raport (średni) - analiza punktowa pozycji pracownika przy koszu po usprawnieniu stanowiska

3.4. Analiza punktowa stanowiska po modyfikacjach

Pierwsza modyfikacja polegająca na przesunięciu kosza na środek stanowiska i zestawieniu go z podestu (Rys. 12) zapewniła pracownikowi krótszą do niego drogę podczas pracy i lepszy dostęp. Raport z analizy przeprowadzonej po zmianie pozycji kosza na stanowisku (Rys. 13) potwierdza zaletę wprowadzenia takiego rozwiązania, o czym świadczy ocena postawy pracownika na 97,8% po modyfikacji, w porównaniu z wynikiem 96,4 % przed wprowadzeniem zmiany.

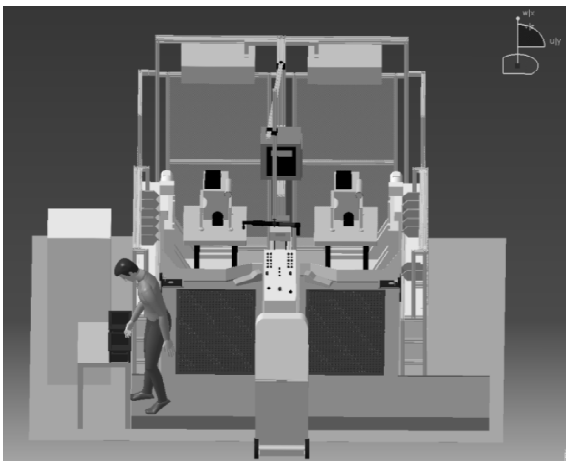
Pozycję pracownika przy poborze opasek zaciskowych po usprawnieniu stanowiska przedstawiono na Rys. 14 a raport z analizy przeprowadzonej dla tej pozycji ilustruje Rys. 15. Raport wskazuje, że istotny wpływ na komfort



Rys. 14. Pozycja pracownika przy skrzynkach po usprawnieniu stanowiska

Display		Hand filter	
<input checked="" type="radio"/> List	<input type="radio"/> Chart	<input checked="" type="radio"/> Whole Hand	<input type="radio"/> Separ
Segments	Side	Result (%)	
All (all DOF)		97,6	
All		97,6	
Selected			
Favorite			
Other			
Lumbar (Spine)		100,0	
Thoracic (Spine)		99,7	
Neck		100,0	
Thigh	L	100,0	
	R	100,0	
Leg	L	100,0	
	R	100,0	
Foot	L	100,0	
	R	100,0	
Clavicular	L	100,0	
	R	91,9	
Arm	L	100,0	
	R	91,5	
ForeArm	L	100,0	
	R	81,2	
Whole Hand	L	100,0	
	R	91,4	

Rys. 15. Raport (średni) - analiza punktowa pozycji pracownika przy skrzynkach po usprawnieniu stanowiska



Rys. 16. Pozycja pracownika przy skrzynkach ustawionych na stole po usprawnieniu stanowiska

Display		Hand filter	
<input checked="" type="radio"/> List	<input type="radio"/> Chart	<input checked="" type="radio"/> Whole Hand	<input type="radio"/> Separ
Segments	Side	Result (%)	
All (all DOF)		96,1	
All		96,1	
Selected			
Favorite			
Other			
Lumbar (Spine)		96,7	
Thoracic (Spine)		87,7	
Neck		84,8	
Thigh	L	100,0	
	R	100,0	
Leg	L	100,0	
	R	100,0	
Foot	L	100,0	
	R	100,0	
Clavicular	L	100,0	
	R	100,0	
Arm	L	100,0	
	R	95,2	
ForeArm	L	100,0	
	R	81,8	
Whole Hand	L	100,0	
	R	91,4	

Rys. 17. Raport (średni) - analiza punktowa pozycji pracownika przy skrzynkach ustawionych na stole po usprawnieniu stanowiska

Modyfikacja położenia skrzyń polegająca na umieszczeniu ich na stole (Rys. 16), dzięki czemu pracownik

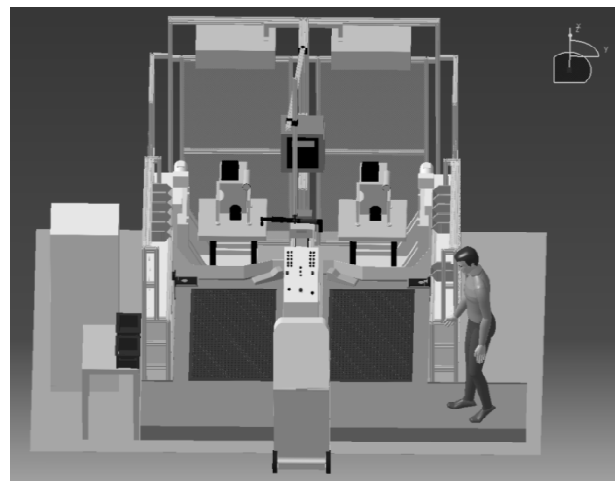
nie musi kucać, aby pobrać przedmioty ze skrzyń, w znacznym stopniu poprawia to komfort pracy. Raport analizy stanowiska po modyfikacji położenia skrzyń (Rys. 17) wskazuje, że pozycja pracownika uległa znaczącej poprawie. Osiągnięte 96,1% po modyfikacji w stosunku do 85,6% przed modyfikacją świadczy o celowości wprowadzenia takiego udogodnienia. Z porównania raportów przed modyfikacją i po jej wykonaniu wyraźnie widać, że położenie kończyn, a zwłaszcza kręgosłupa i nóg jest dużo lepsze, o czym świadczą wyniki procentowe.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W Tab. 1 zebrano wyniki usprawnień w postaci oceny punktowej przed i po modyfikacji modelu stanowiska. Wyniki przedstawione są w % a 100% oznacza maksymalną ilość punktów, co jest równoznaczne z osiągnięciem przez pracownika najdogodniejszej postawy jego ciała, zapewniającej najmniejsze obciążenie fizyczne mięśni i układu kostnego. Analizując wartości procentowe oceny postawy pracownika przed i po usprawnieniach wynika, że wszystkie modyfikacje przyniosły pozytywny efekt, i mogą być wprowadzone na rzeczywistym stanowisku.

Tab. 1. Zestawienie oceny zmian stanowiska

Usprawnienie	Wynik oceny przed zmianą [%]	Wynik oceny po zmianie [%]
Przesunięcie kosza	96,4	97,8
Przesunięcie skrzynek	96,2	97,6
Przesunięcie skrzyń	85,6	96,1



Rys. 18. Model stanowiska zawierający wprowadzone usprawnienia

Po przeprowadzonej analizie i ocenie wprowadzonych propozycji zmian na stanowisku został opracowany jego finalny model przedstawiony na Rys. 18, uwzględniający wszystkie zmiany, które umożliwiły skrócenie drogi poruszania się pracownika podczas wykonywania pracy, a także poprawiły komfort jego pracy poprzez dogodniejsze rozmieszczenie elementów wyposażenia stanowiska. Zmiany te powinny zostać wdrożone na rzeczywistym stanowisku.

Dodatkowo w programie *CATIA* można także przeprowadzić analizy dynamiczne obciążeń podczas wykonywania pracy, jednak w tym przypadku ograniczono się jedynie do wstępnej analizy punktowej, która i tak dała wymierne korzyści.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowanie Inżynierii Odwrotnej w procesie analizy funkcjonowania i modelowania stanowisk pracy, a zwłaszcza użycie w tym procesie skanerów 3D znacznie przyspiesza i ułatwia proces tworzenia cyfrowego modelu stanowiska pracy. Akwizycja danych trwa bardzo krótko, bo zaledwie od kilku do kilkunastu minut, a rezultatem jest „chmura” punktów uporządkowanych w przestrzeni. Z punktów tych można wyznaczyć wszystkie niezbędne wymiary potrzebne do modelowania stanowiska. Utworzony model można dowolnie modyfikować, a przy wykorzystaniu narzędzi do analizy ergonomicznej, można dostosować do określonych wymagań pracowników. Metoda będzie z pewnością coraz częściej stosowana i wraz z rozwojem możliwości skanerów 3D, sprzętu komputerowego i oprogramowania, proces ten zostanie prawdopodobnie całkowicie zautomatyzowany. Zastosowanie prezentowanej technologii staje się w przemyśle coraz powszechniejsze i zapewnia wymierne korzyści finansowe poprzez zwiększenie wydajności i jakości pracy.

LITERATURA

1. **Cała M.** (2005), *CATIA V5 – od koncepcji wyrobu do gotowej formy. Oprogramowanie dla inżynierii mechanicznej*, 14-18.
2. **Clark T. S., Corlett E. N.** (1984), *The Ergonomics Of Workspaces and Machines. A Design Manual*, Taylor and Francis, London.
3. **Garnik I.** (2000), *Metody ergonomicznego projektowania przestrzeni stanowisk pracy. Wybrane metody ergonomii i nauki o eksploatacji*, Red. O. Downarowicz, Gdańsk, 73-82.
4. **Liptak A., Matuszek J.** (2009), *CATIA V5 – Projektowanie i analiza ergonomiczna stanowisk pracy*, *Zeszyty Naukowe ATH*, 55-58.
5. **Mast C., Berg M.** (1997), *Prototyping of Supermarket Designs using Virtual Reality*. Pemberton S. (Ed) *Proceedings CHI97 Looking to the Future (extended Abstracts)*, ACM Press New York, 321-322.
6. **Matuszek J., Gregor M., Kurczyk D.** (2009), *Zastosowanie wielkofarmatowego skanowania obiektów przemysłowych w procesach przygotowania produkcji*, Konferencja KZZ Zakopane.
7. **Myrcha K., Kalwasiński D., Skoniecki A.** (2004), *Modelowanie komputerowe w celu profilaktyki zagrożeń mechanicznych*, *Przegląd mechaniczny*, 63, 24-26.
8. **Wyleżał M.** (2006), *Inżynieria odwrotna w doskonaleniu konstrukcji*, *Modelowanie inżynierskie*, 32, 485-490.

THE OPTIMIZATION OF THE WORKPLACE WITH THE USE OF REVERSE ENGINEERING (RE)

Abstract: In the article, the process of creating digital model of real workplace is presented. The process is based on Reverse Engineering technology. The existing workplace was scanned, and on the basis of achieved point cloud, the spatial digital model has been worked out. What is more, the modification and ergonomic analysis of the model in *CATIA* program is provided.