

Grzegorz DAHLKE*

MODELOWANIE SYMULACYJNE W ERGONOMII I BEZPIECZEŃSTWIE PRACY

W artykule zaprezentowano możliwości wykorzystania w procesie projektowania oraz diagnozowania warunków pracy aplikacji komputerowych zawierających cyfrowe modele człowieka (*Digital Human Model* – DHM). We wprowadzeniu scharakteryzowano podstawowe klasyfikacje modeli. Następnie określono metody oceny zastosowane w przytoczonych programach. Zaprezentowano również przykład oceny ergonomiczności czynności podczas pracy za pomocą aplikacji 3DSSPP.

Słowa kluczowe: ergonomia, bezpieczeństwo pracy, ocena ergonomiczności, modelowanie symulacyjne

1. WPROWADZENIE

1.1. Ergonomiczność jako kryterium projektowania procesu pracy

Ergonomiczność jako pojęcie wyrażające dopasowanie produktu lub procesu do możliwości psychofizycznych człowieka w sposób nie pogarszający jego dyskomfortu i zdrowia może stanowić wyznacznik nowoczesności [4].

Pracodawcy i projektanci sięgają po wiedzę z zakresu ergonomii w celu:

- zaprojektowania wyrobów lub stanowisk pracy z uwzględnieniem cech (sił, wymiarów itp.) i możliwości człowieka;
- zdobycia przewagi nad konkurencją przez wypromowanie w produkcji cech istotnych dla użytkowników;

* Katedra Ergonomii i Inżynierii Jakości, Wydział Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej.

- uwzględnienia ich w organizowanych stanowiskach pracy zgodnie z wymogami prawa (Dyrektywa 98/37/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 czerwca 1998 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstwa Państw Członkowskich odnoszących się do maszyn – 1.1.2 d) „Niewygoda, zmęczenie i napięcie odczuwane przez operatora w zamierzonych warunkach użytkowania muszą być ograniczone do możliwego minimum, z uwzględnieniem zasad ergonomii”; Dyrektywa Rady z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy (89/391/EWG) – „3. Bez uszczerbku dla innych zasad określonych w niniejszej dyrektywie pracodawca powinien również uwzględniać w planowanych przedsięwzięciach rodzaj działalności produkcyjnej przedsiębiorstwa i/lub firmy: [...] b) przy zleceniu części zadań pracownikom w tym zakresie należy brać pod uwagę ich możliwości odnośnie do zdrowia i bezpieczeństwa”;
- zwiększenia wydajności pracy;
- wykrycia przyczyn wypadków i chorób pracowników (przede wszystkim chorób zawodowych).

Projektując i organizując proces pracy, należy przewidywać skutki dla zdrowia pracownika. Do wspomagania tego procesu można stosować programy komputerowe, szczególnie wykorzystujące techniki hipermedialne.

1.2. Techniki hipermedialne w modelowaniu symulacyjnym

Podstawową cechą technik hipermedialnych stosowanych do celów edukacyjnych i szkoleniowych oraz w celu prezentacji przetworzonych danych w zarządzaniu i projektowaniu, a szczególnie w obszarze bezpieczeństwa pracy jest modelowanie sytuacji, które mogą się zdarzyć w rzeczywistości.

Hipermedia są rozszerzeniem hipertekstu o inne media, takie jak [1]:

- dane z baz danych i arkuszy kalkulacyjnych,
- grafikę (piktogramy, zdjęcia, rysunki, diagramy),
- dźwięk,
- obrazy (filmy i animacje).

Model jest bezpośrednim przedstawieniem naszego wyobrażenia o logicznie całościowym fragmencie rzeczywistości. Modelowanie środowiska pracy wspomaganie technikami komputerowymi jest powszechnie stosowane w projektowaniu [8, 9] i umożliwia optymalizację rozwiązań projektowych przed rozpoczęciem prac wdrożeniowych. W przypadku procesów decyzyjnych modelowanie jest prezentacją odpowiednich aspektów sytuacji problemowej będącej przedmiotem rozważań. Model przedstawia w sposób uporządkowany i (w różnym stopniu) sformalizowany obraz rzeczywistości na podstawie informacji, jakie o niej posiadamy, i metody formalizacji [2].

Można wyróżnić kilka klasyfikacji modeli. Pod względem podobieństwa do wzorca wyróżnia się modele [2]:

- normatywne, w których wybrane cechy określa się jako wzorcowe,
- pozytywne, będące uproszczoną wersją oryginału.
Biorąc pod uwagę sposób wyrażenia rzeczywistości, wyróżnia się modele [2]:
- werbalne,
- analogowe (fizyczne lub ikonograficzne),
- formalne (matematyczne, symboliczne, normatywne),
- mentalne niesformalizowane, oparte na heurystykach modelującego.
Ponadto wyróżnia się modele [2]:
- konkretne i abstrakcyjne,
- statyczne i dynamiczne (jedną ze zmiennych jest czas),
- deterministyczne i stochastyczne,
- heurystyczne i symulacyjne.

Modele heurystyczne stosunkowo najskuteczniej odwzorowują behawioralną złożoność systemów rzeczywistych. Odwzorowanie zachowań ludzkich należy do tzw. modelowania miękkiego. W praktyce spotyka się rozwiązania mieszane, polegające na wzbogacaniu twardych modeli algorytmicznych technikami miękkimi [33].

Kolejną możliwością zastosowania technik hipermedialnych jest symulacja, wykorzystywana, gdy konieczne jest [2]:

- zweryfikowanie hipotezy, której analiza w rzeczywistości byłaby bardzo kosztowna lub niebezpieczna,
- dokonanie oceny nowych systemów przed ich wdrożeniem, aby wyeliminować niedoskonałości i usterki,
- przewidywanie wydarzeń mogących nastąpić w przyszłości.

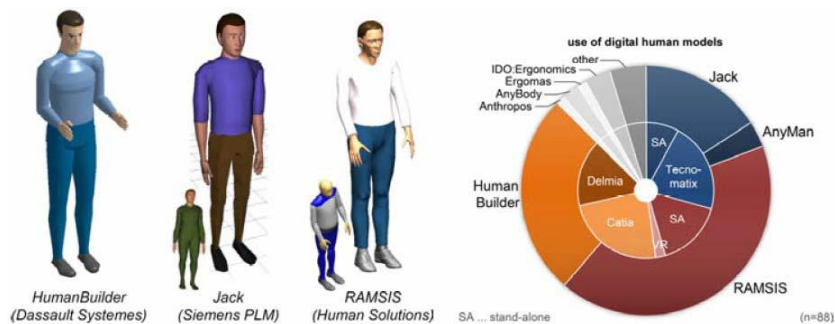
Komputerowe aplikacje hipermedialne wspomagające podejmowanie decyzji w zakresie stanu warunków pracy w firmach pod względem zastosowania można podzielić na następujące grupy [3]:

- programy szkoleniowe,
- programy do oceny ryzyka zawodowego,
- bazy danych o pracownikach, zakładzie, środkach ochrony osobistej itp.,
- programy wspomagające projektowanie.

Bardzo zaawansowaną grupę narzędzi wspomagających projektowanie stanowisk pracy są aplikacje komputerowe stosujące modele człowieka (DHM – *Digital Human Model*) [32]. Mogą one stanowić odrębne moduły, a ponadto mogą współpracować z aplikacjami wspomagającymi projektowanie (CAD) lub wytwarzanie (CAM), jak np. AutoCAD, Solid Edge, Solid Works, Catia.

Należą do nich np.:

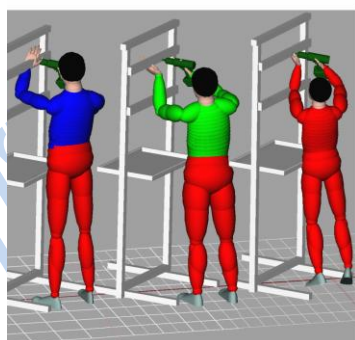
- EMA (*Editor Menschlicher Arbeit*) (rys. 2 i 3) [12],
- Alaska / Dynamicus (rys. 4) [14],
- Delmia (rys. 5) [10],
- JACK (rys. 1) [13],
- RAMSIS (*Rechnergestütztes Anthropometrisch-Mathematisches System zur Insassen-Simulation*) [11];
- 3DSSPP (*3D Static Strength Prediction Program*) [15].



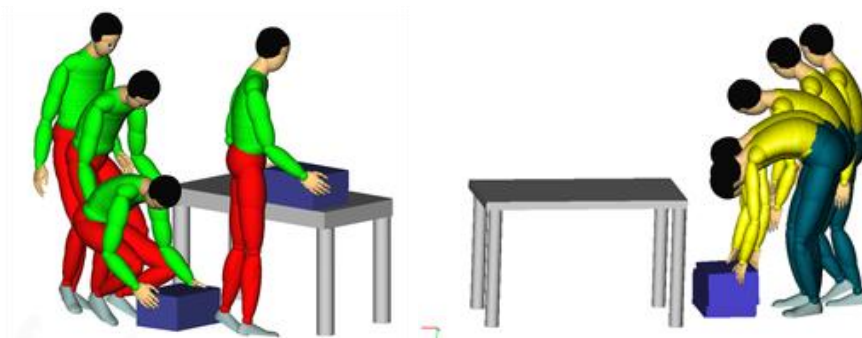
Rys. 1. Przykłady modeli człowieka stosowanych w inżynierii produkcji [32]



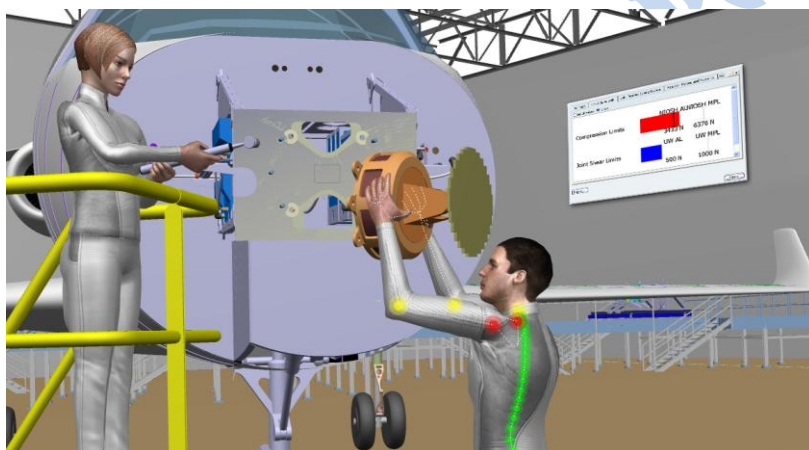
Rys. 2. Przykładowy widok ekranu modelu EMA [12]



Rys. 3. Tworzenie i walidacja empiryczna EMA: doświadczalne ustawienie w celu skanowania ruchu przy złożonej operacji z wkrętarką akumulatorową (chwyt rewolwerowy) [7]



Rys. 4. Przykładowy widok stanowisk pracy w modelu Alaska / Dynamicus [14]



Rys. 5. Przykładowy widok stanowisk pracy w modelu DELMIA [10]

W kolejnym punkcie zostaną zaprezentowane kryteria i metody oceny ergonomiczności wykorzystywane w wymienionych wyżej aplikacjach.

2. OCENA ERGONOMICZNOŚCI NA PRZYKŁADZIE APLIKACJI KOMPUTEROWYCH

2.1. Kryteria oceny ergonomiczności w normalizacji

W wielu definicjach ergonomii można zauważyć różnorodność i interdyscyplinarność kryteriów oceny ergonomiczności. Zostały one uwzględnione w normach, np. w:

- projekcie normy PN-88/N-08007 Atestacja ergonomiczna maszyn i urządzeń [22];
- wycofanej normie PN-81/N-08010 Ergonomiczne zasady projektowania systemów pracy [20];
- wycofanej normie PN-83/N-08015 Ergonomia. Terminologia. Pojęcia ogólne [21];
- PN-EN 614-1:2006+A1:2009 Bezpieczeństwo maszyn – Ergonomiczne zasady projektowania – Część 1: Terminologia i zasady ogólne [28];
- PN-EN 614-2+A1:2010 Bezpieczeństwo maszyn – Ergonomiczne zasady projektowania – Część 2: Interakcje między projektowaniem maszyn a zadaniami roboczymi [29];
- PN-EN ISO 12100:2012 Bezpieczeństwo maszyn – Ogólne zasady projektowania – Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka [31];
- PN-EN 894:2010 Bezpieczeństwo maszyn – Wymagania ergonomiczne dotyczące projektowania wskaźników i elementów sterowniczych [30];
- PN-EN 1005+A1 Bezpieczeństwo maszyn – Możliwości fizyczne człowieka:
 - a) Część 1: Terminy i definicje (2010 r.) [23],
 - b) Część 2: Ręczne przemieszczanie maszyn i ich części (2010 r.) [24],
 - c) Część 3: Zalecane wartości graniczne sił przy obsłudze maszyn (2009 r.) [25],
 - d) Część 4: Ocena pozycji pracy i ruchów w relacji do maszyny (2009 r.) [26],
 - e) Część 5: Ocena ryzyka dotycząca czynności wykonywanych z dużą częstotliwością powtórzeń (2007 r.) [27];
- ISO 11226:2000 Ergonomics – Evaluation of static working postures [16];
- ISO 11228 Ergonomics – Manual handling:
 - a) Part 1: Lifting and carrying (2003 r.) [17],
 - b) Part 2: Pushing and pulling (2007 r.) [18],
 - c) Part 3: Handling of low loads at high frequency (2007 r.) [19].

W programach komputerowych opartych na wykorzystaniu modeli DHM stosuje się metody i kryteria oceny ergonomiczności podane w powyższych normach, np. w ISO 11228.

W normie ISO 11228-3:2007 [19], która została przygotowana przez komitet techniczny ISO/TC 159: Ergonomia, podkomitet SC3 – Antropometria i biomechanika, wyszczególniono metody umożliwiające ocenę obciążenia posturalnego człowieka podczas pracy. Są to:

- OWAS,
- RULA,
- REBA,
- PLIBEL,
- Strain Index,
- QEC,
- OSHA Check List,
- HAL / TLV ACGiH,
- Upper Limb Expert Tool,
- OCRA Checklist.

2.2. Kryteria oceny ergonomiczności w analizowanych aplikacjach komputerowych

Podstawowym celem zastosowania modeli DHM jest prezentacja zachowań człowieka w projektowanej lub ocenianej przestrzeni pracy. Ponadto wybrane z nich wizualizują zagrożenia dla zdrowia przez oznaczanie kolorami narażonych segmentów układu ruchu lub stosowanie komunikatów tekstowych. Szczegółowe zestawienie metod zastosowanych w analizowanych aplikacjach zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka wybranych modeli DHM.
Oprac. własne na podst. [7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 32]

Lp.	Nazwa modelu DHM	Charakterystyka możliwości oceny	Metody oceny
1	2	3	4
1	EMA	umożliwia symulację przestrzeni pracy oraz ruchów pracownika i wskazanie ergonomicznych czynników ryzyka z wykorzystaniem metody EAWS	EAWS (w ocenie uwzględnia się m.in.: pozycję przy pracy, siłę wywieraną przez pracownika, masy przemieszczane podczas pracy, zastosowanie środków transportu bliskiego, częstotliwość powtórzeń i trajektorie ruchów, rodzaje stosowanych chwytów rąk)
2	Alaska/ Dynamicus	oparty również na metodzie EAWS; umożliwia skanowanie ruchów pracownika i prezentowanie skumulowanej oceny ryzyka; wyniki narażeń pracownika są prezentowane m.in. za pomocą barw na segmentach układu ruchu	EAWS (w ocenie uwzględnia się m.in.: pozycję przy pracy, siłę wywieraną przez pracownika, masy przemieszczane podczas pracy, zastosowanie środków transportu bliskiego, częstotliwość powtórzeń i trajektorie ruchów, rodzaje stosowanych chwytów rąk)
3	Delmia	składa się z modułów DELMIA Ergonomics Analysis (EGA), DELMIA Ergonomics Evaluation (EGE)	Rapid Upper Limb Assessment, Lifting and Lowering Analysis, Push, Pull and Carry Analysis, Biomechanics Analysis
4	JACK	umożliwia zaprojektowanie procesu pracy i wprowadzenie modelu człowieka o określonych cechach antropometrycznych; pozwala na analizowanie zasięgów i obciążeń układu ruchu; za pomocą dodatku Motion Capture w środowisku Process Simulate możliwe jest tworzenie animacji rzeczywistych ruchów człowieka	równanie NIOSH (analiza mas i sił podczas ręcznych prac transportowych); RULA; OWAS; równania 3D Static Strength, opracowane przez University of Michigan

tabela 1 cd.

1	2	3	4
5	RAMSIS	dostępne moduły: Automotive, Industrial Vehicles, Bus & Truck, Aircraft, Anthroscan, Cognitive, 2008/2/EG, Safety, NASA Analyse, REFA Analyse, NIOSH Analyse; dostępny jako odrębna aplikacja lub moduł w CATIA V5 i V6	NIOSH Analysis (obliczanie zalecanej dopuszczalnej masy przemieszczanej przez pracownika; możliwość różnicowania cech antropometrycznych); REFA Analysis (obliczanie normalnej i maksymalnej siły oraz limitu obciążenia pracownika; analiza różnych kryteriów szczegółowych związanych z ręcznymi pracami transportowymi); NASA Discomfort Analysis (łącna ocena statyczno-fizyczna całego ciała; ocena sił i momentów sił działających na człowieka; ocena obciążeń przy braku przyspieszenia ziemskiego; analiza rozkładu sił); wyznaczanie maksymalnych sił działających na pracownika
6	3DSSPP	umożliwia odwzorowanie poszczególnych pozycji statycznych lub ruchu pracownika	3D Static Strength, opracowane przez University of Michigan (obliczanie i analiza sił i momentów sił działających na poszczególne stawy)

Projektując stanowisko pracy w środowisku CAD, po zastosowaniu prezentowanych w tabeli 1 modułów projektant otrzymuje wiele szczegółowych danych na temat przestrzeni pracy. Może również dokonać symulacji ruchu i otrzymać całościową ocenę narażeń pracownika wg wybranych metod (tabela 1, kolumna 4). Skanując ruch pracownika na istniejącym stanowisku pracy, można również przetworzyć dane na ocenę, która ułatwi opracowanie projektu zmian modernizacyjnych.

3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA APLIKACJI Z DHM W OCENIE ERGONOMICZNOŚCI STANOWISK PRACY

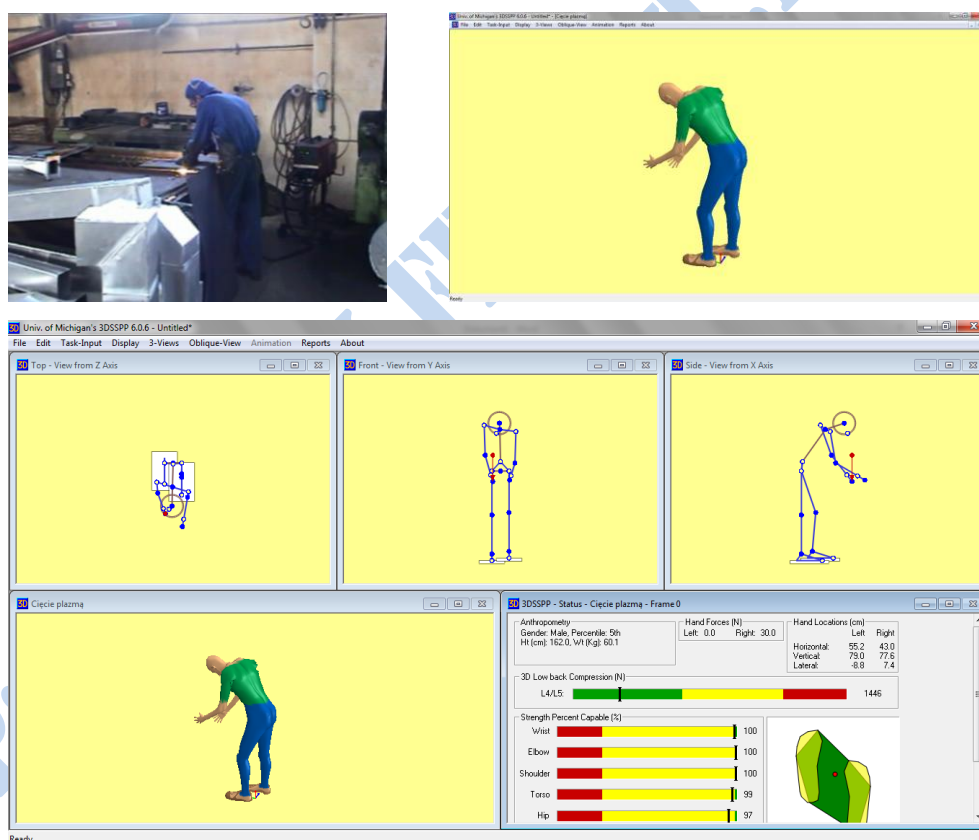
Zastosowanie aplikacji 3DSSPP zostanie zaprezentowane na przykładzie dwóch stanowisk spawaczy. Praca na pierwszym stanowisku wykonywana jest w pozycji stojącej (rys. 6), a praca na stanowisku drugim – w pozycji siedzącej (rys. 7).

W raportach otrzymanych z użyciem programu są zaprezentowane:

- możliwości przyjęcia pozycji (nadgarstków, przedramion, ramion, tułowia, stawów biodrowych, kolanowych i skokowych) w populacji;
- uciski na dysk L4/L5 z prezentacją wartości zalecanych;

- położenie środka ciężkości całego ciała;
- maksymalną siłę skurczu mięśni w procentach (MVC – *maximum voluntary contraction*) dla stron lewej i prawej;
- siły działające na poszczególne mięśnie w kierunkach X, Y i Z;
- momenty sił działające na poszczególne segmenty układu ruchu;
- położenie katowe poszczególnych segmentów układu ruchu.

Odwzorowanie pozycji pracownika może się odbywać za pomocą myszy lub klawiatury i myszy. Punkty widoczne na rys. 6 i 7 (na schematach patyczkowych modelu człowieka) są hiperaktywne i jest możliwe kształtowanie pozycji pracownika. Można kształtować położenie poszczególnych segmentów układu ruchu w trzech płaszczyznach, a na podglądzie widoczny jest dokładniejszy model człowieka. Jednocześnie w prawym dolnym rogu ekranu (rys. 6 i 7) są widoczne obciążenia krążka międzykręgowego L4/L5 oraz osiągnięcie granicznych zakresów ruchu.



Rys. 6. Przykładowe widoki ekranu aplikacji 3DSSPP z analizą obciążeń na stanowisku spawania w pozycji stojącej. Fot. G. Dahlke; widoki aplikacji 3DSSPP [15] – licencja: Politechnika Poznańska



Rys. 7. Przykładowe widoki ekranu aplikacji 3DSSPP z analizą obciążeń na stanowisku spawania w pozycji siedzącej. Fot. G. Dahlke; widoki aplikacji 3DSSPP [15] – licencja: Politechnika Poznańska

W odniesieniu do prac dynamicznych w raportach są podane przedziały zmian poszczególnych parametrów. Przekroczenie zalecanych wartości jest informacją dla projektanta lub osoby oceniającej proces pracy, że należy dokonać zmian ukształtowania i rozmieszczenia stref pracy.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Po rozpowszechnieniu powyższych aplikacji wśród projektantów procesów produkcyjnych oraz maszyn będzie możliwe uwzględnienie wybranych kryteriów dotyczących możliwości psychofizycznych człowieka w obiektach technicznych. Poprawne dostosowanie się do wniosków otrzymywanych w wyniku analiz umożliwi

uniknięcie narażeń pracowników na utratę zdrowia. W wielu uczelniach technicznych w Polsce nie wykorzystuje się modułów z modelami DHM w procesie kształcenia konstruktorów. Efekty są niestety widoczne w praktyce, podczas diagnozowania ergonomiczności stanowisk pracy i prowadzonych na nich procesów.

LITERATURA

- [1] Beynon-Davies P., Inżynieria systemów informacyjnych, WNT, Warszawa 1999.
- [2] Bielecki W.T., Informatyzacja zarządzania, PWE, Warszawa 2001.
- [3] Dahlke G., Model zarządzania bezpieczeństwem pracy z wykorzystaniem technik multimedialnych w przedsiębiorstwie budowy maszyn, rozprawa doktorska pod kierunkiem prof. A. Jasiak, Wydział Informatyki i Zarządzania PP, Poznań 2004.
- [4] Dahlke G., Repiński M., Śnieżko P., Ocena ergonomiczności stanowisk pracy motorniczych tramwajów, Logistyka / Instytut Logistyki i Magazynowania, 2014, nr 3.
- [5] Dyrektywa 98/37/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 czerwca 1998 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstwa Państw Członkowskich odnoszących się do maszyn.
- [6] Dyrektywa Rady z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy (89/391/EWG).
- [7] Fritzsche L., Jendrusch R., Leidholdt W., Bauer S., Jäckel T., Pirger A., Introducing EMA (Editor for Manual Work Activities) – A New Tool for Enhancing Accuracy and Efficiency of Human Simulations in Digital Production Planning, w: Digital Human Modeling, Third International Conference, ICDHM 2011, Held as Part of HCI International, 2011, Vol. 6777, Springer, Berlin–Heidelberg 2011.
- [8] Grobelny J., Kuliński M., Computer aids in ergonomic design of the office space, chapter VIII, w: L.M. Pacholski i in., Work quality conditions in researches and education in ergonomics, work safety and labour protection, Monograph Published by Institute of Management Engineering, Poznan University of Technology, Poznań 2003.
- [9] Grobelny J., Kuliński M., Computer graphics and animation in ergonomics design studies, w: Proceedings of the 17th International Seminar of Ergonomics Teachers, Poznań University of Technology, 17-19 September, Poznań 2001, s. 49-60.
- [10] <http://www.3ds.com> (dostęp: 30.06.2014).
- [11] <http://www.human-solutions.com> (dostęp: 30.06.2014).
- [12] <http://www.imk-automotive.de> (dostęp: 30.06.2014).
- [13] <http://www.plm.automation.siemens.com> (dostęp: 30.06.2014).
- [14] <http://www.tu-chemnitz.de> (dostęp: 30.06.2014).
- [15] <http://www.umich.edu/~ioe/3DSSPP/index.html> (dostęp: 30.06.2014).
- [16] ISO 11226:2000 Ergonomics – Evaluation of static working postures.
- [17] ISO 11228 Ergonomics – Manual handling. Part 1: Lifting and carrying (2003).
- [18] ISO 11228 Ergonomics – Manual handling. Part 2: Pushing and pulling (2007).
- [19] ISO 11228 Ergonomics – Manual handling. Part 3: Handling of low loads at high frequency (2007).
- [20] PN-81/N-08010 Ergonomiczne zasady projektowania systemów pracy.
- [21] PN-83/N-08015 Ergonomia. Terminologia. Pojęcia ogólne.

- [22] PN-88/N-08007 Atestacja ergonomiczna maszyn i urządzeń.
- [23] PN-EN 1005+A1 Bezpieczeństwo maszyn – Możliwości fizyczne człowieka. Część 1: Terminy i definicje, 2010.
- [24] PN-EN 1005+A1 Bezpieczeństwo maszyn – Możliwości fizyczne człowieka. Część 2: Ręczne przemieszczanie maszyn i ich części, 2010.
- [25] PN-EN 1005+A1 Bezpieczeństwo maszyn – Możliwości fizyczne człowieka. Część 3: Zalecane wartości graniczne sił przy obsłudze maszyn, 2009.
- [26] PN-EN 1005+A1 Bezpieczeństwo maszyn – Możliwości fizyczne człowieka. Część 4: Ocena pozycji pracy i ruchów w relacji do maszyny, 2009.
- [27] PN-EN 1005+A1 Bezpieczeństwo maszyn – Możliwości fizyczne człowieka. Część 5: Ocena ryzyka dotycząca czynności wykonywanych z dużą częstością powtórzeń, 2007.
- [28] PN-EN 614-1:2006+A1:2009 Bezpieczeństwo maszyn – Ergonomiczne zasady projektowania - Część 1: Terminologia i zasady ogólne.
- [29] PN-EN 614-2+A1:2010 Bezpieczeństwo maszyn – Ergonomiczne zasady projektowania - Część 2: Interakcje między projektowaniem maszyn a zadaniami roboczymi.
- [30] PN-EN 894:2010 Bezpieczeństwo maszyn – Wymagania ergonomiczne dotyczące projektowania wskaźników i elementów sterowniczych.
- [31] PN-EN ISO 12100:2012 Bezpieczeństwo maszyn – Ogólne zasady projektowania – Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka.
- [32] Schaub K.G., Mühlstedt J., Illmann B., Bauer S., Fritzsche L., Wagner T., Bullinger-Hoffmann A.C., Bruder R., Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the 'ergonomics assessment worksheet' (EAWS), *Int. J. Human Factors Modelling and Simulation*, 2012, Vol. 3, No. 3/4.
- [33] Swanstrom E., A Brief Introduction to the Object Oriented Change and Learning TM (OOCL) Methodology, 1996, <http://www.agiliscorp.com/ooclnovr.html> (dostęp: 15.03.2004).

SIMULATION MODELING IN ERGONOMICS AND OCCUPATIONAL SAFETY

Summary

The article was presented the possibility of apply in the process of projecting and diagnosing of work conditions, computer applications including the digital human models (DHM). The basic classifications of models characterized in first chapter. The methods of estimation which were applied in quoted programmes were qualified then. The example of the assessment of the work conditions in using the application 3DSSPP was also presented.