



WIZUALIZACJA, SYMULACJA I WIELOKRYTERIALNA OCENA WARIANTÓW W PROJEKTOWANIU SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Sławomir Kukla

Katedra Inżynierii Produkcji, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Polska

Corresponding author:

Sławomir Kukla

Katedra Inżynierii Produkcji

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Polska

phone: (+48) 33 8279234

e-mail: skukla@ath.bielsko.pl

VISUALIZATION, SIMULATION AND MULTI-CRITERIA EVALUATION OF VARIANTS
IN THE DESIGN OF PRODUCTION SYSTEMS

ABSTRACT

The paper presents issues of production processes design and improvement. In order to visualize the production system functioning and estimate its efficiency, a simulation model has been created, on which a simulation experiment was carried out. Due to many factors influencing the effectiveness of processes, it was suggested to use multi-criteria evaluation tools to choose the rational solution. Three criteria have been assumed, according to which particular improvement variants were evaluated. Also, criteria weights have been set according to the Saaty's method, and particular solution variants have been assessed separately with respect to each criterion. On the basis of the presented course of action, the best solution has been selected from among the analysed options.

KEYWORDS

Modelling and simulation of production systems, multi-criteria variants analysis, visualization of production systems.

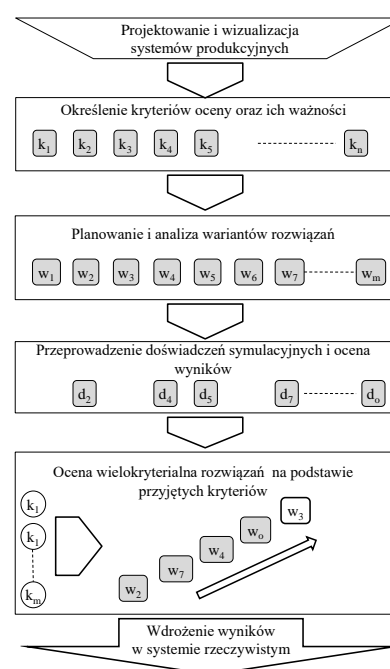
1. Wprowadzenie

Rozwój technik komputerowych przyczynił się do powstania nowych narzędzi wspomagających projektowanie i zarządzanie procesami wytwarzania. Zaczęto opracowywać pakiety programowe do modelowania i symulacji oraz wizualizacji i animacji przebiegów produkcji z uwzględnieniem również zagadnień ergonomicznych. W coraz większym stopniu następuje więc przenikanie świata realnego z wirtualnym. W odpowiedzi na tendencje łączenia świata wirtualnego z realnym w praktyce produkcyjnej powstała idea cyfrowej fabryki, której celem jest integracja systemów informatycznych przedsiębiorstwa z technologią wirtualizacji produkcji z wykorzystaniem technik symulacyjnych oraz wirtualnej rzeczywistości. Dzięki budowaniu modeli komputerowych różnych wariantów procesu oraz przeprowadzeniu symulacji ich działania istnieje możliwość porównania ich ze sobą oraz wyboru najkorzystniejszego przebiegu procesu wytwarzania z punktu widzenia przyjętych kryteriów oceny [1, 2, 6, 7].

Wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości do optymalizacji oraz innowacyjnego zarządzania systemami produkcyjnymi znajduje coraz częściej zastosowanie również w projektowaniu nowych, bezpiecznych i ergonomicznych stanowisk pracy [5].

W sytuacjach, kiedy nie dysponujemy obiektywnymi wartościami cech ocenianych wariantów rozwiązań możemy posłużyć się eksperymentem symulacyjnym

oraz narzędziami oceny wielokryterialnej. Model komputerowy pozwoli analizować różne scenariusze zdarzeń wpływające na przebieg procesów wytwarzania bez konieczności eksperymentowania w warunkach rzeczywistych. Na rysunku 1 przedstawiono koncepcję wykorzystania wizualizacji, modelowania i symulacji systemów



Rys. 1. Koncepcja badań z wykorzystaniem wizualizacji oraz symulacji systemów produkcyjnych.

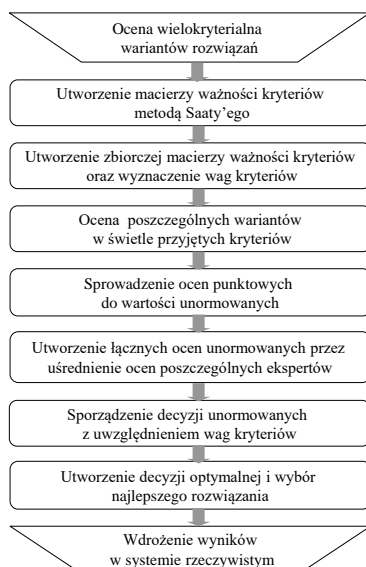
produkcyjnych w powiązaniu z metodą oceny wielokryterialnej wariantów w oparciu o subiektywne oceny punktowe [2, 3, 8].

2. Wielokryterialna ocena wariantów

Kryteria są podstawą oceny w dążeniu do optymalnego wyboru, uściślają opis problemu oraz stanowią czynnik ukierunkowania działań w zakresie racjonalizacji systemów produkcyjnych.

W klasycznych metodach oceny wyróżnia się kryteria o charakterze ilościowym (np. liczba wyprodukowanych sztuk, koszt stanowiskowy, czas realizacji operacji) oraz kryteria o charakterze jakościowym (np. ergonomia, estetyka, jakość wykonania) [3, 4].

Ze względu na konieczność uwzględnienia wielu kryteriów przy ocenie poszczególnych wariantów przebiegu procesów wytwarzania zaproponowano wykorzystanie metody Yagera w wersji punktowej (rys. 2).



Rys. 2. Ocena wielokryterialna wariantów wg metody Yagera.

Do danych wejściowych tej metody zalicza się [4, 9]:

- liczbę kryteriów m ,
- liczbę wariantów przebiegu procesu produkcyjnego n ,
- elementy macierzy ważności poszczególnych kryteriów $B = [b_{ij}]$,
- elementy tablicy $C = [c_{ij}(e)]$, które są unormowanymi ocenami punktowymi i -tego wariantu według j -tego kryterium, ustalonymi przez e -tego eksperta.

Do oceny ważności kryteriów oraz oceny poszczególnych wariantów powołuje się ekspertów. Każdy z ekspertów odpowiedzialny jest za zbudowanie macierzy ocen ważności kryteriów metodą Saaty'ego, w celu porównania kryteriów parami [10]. Poszczególne wartości b_{ij} budowanej macierzy przyjmuje się następująco:

- $b_{ij} = 1$, gdy k_i oraz k_j są równie ważne,
- $b_{ij} = 3$, gdy k_i jest nieco ważniejsze od k_j ,
- $b_{ij} = 5$, gdy k_i jest dużo ważniejsze od k_j ,
- $b_{ij} = 7$, gdy k_i jest wyraźnie ważniejsze od k_j ,
- $b_{ij} = 9$, gdy k_i jest absolutnie ważniejsze od k_j ,

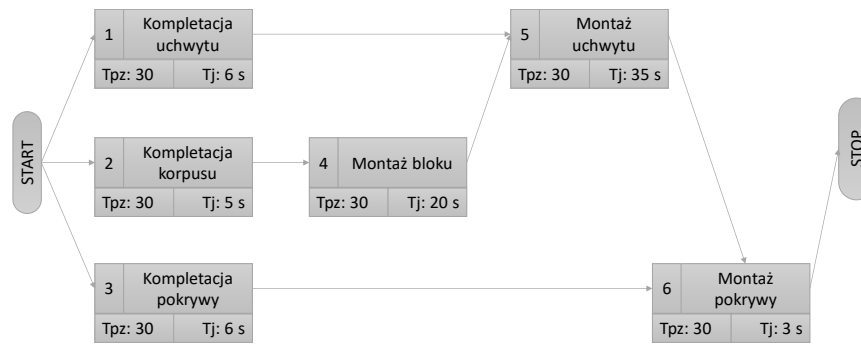
- $b_{ij} = 2, 4, 6, 8$ – wartości pośrednie między opisanymi wyżej sytuacjami,
- $b_{ji} = 1/b_{ij}$.

W dalszej kolejności tworzy się zbiorczą macierz ważności kryteriów, a dla zbiorczej macierzy ważności poszukuje się wektora własnego Y . Współrzędne wektora własnego Y nazywa się wagami kryteriów, które to wyrażają ważność odpowiadających im kryteriów. W dalszej kolejności sprowadza się oceny punktowe $S_{ij}(e)$ do wartości unormowanych $c_{ij}(e)$. Kolejny etap metody Yagera polega na utworzeniu łącznych ocen unormowanych przez uśrednienie ocen podanych przez poszczególnych ekspertów. Dalsze postępowanie polega na utworzeniu decyzji unormowanych przez podniesienie każdego składnika kolejnych ocen unormowanych do potęgi równej odpowiadającej im wadze. W rezultacie tworzy się jedną tzw. decyzję optymalną, na podstawie której wybiera się racjonalny przebieg procesu produkcyjnego, który najlepiej spełnia wszystkie przyjęte do oceny kryteria z uwzględnieniem ich ważności. W opisywanej metodzie decyzja optymalna jest decyzją typu minimum, a najlepszym wariantem przebiegu procesu produkcyjnego jest wariant, któremu odpowiada największy składnik w tzw. decyzji optymalnej, czyli największa wartość stopnia przynależności [4, 9].

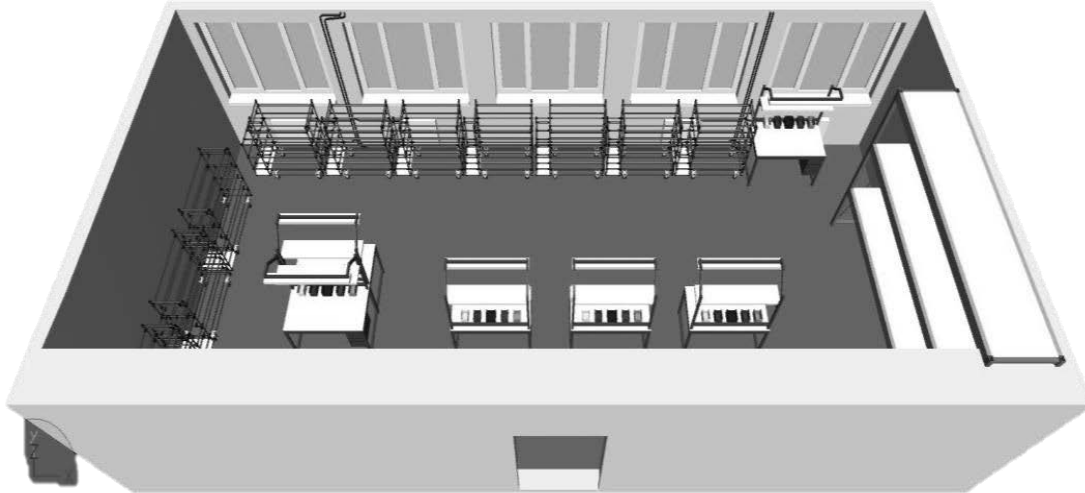
3. Przykład wykorzystania wizualizacji, symulacji oraz narzędzi oceny wielokryterialnej w doskonaleniu systemów

Dla zobrazowania możliwości wykorzystania prezentowanego toku postępowania posłużono się systemem wytwarzania, na którym realizowane są operacje montażowe wyposażenia biurowego. Kolejność realizacji operacji oraz czasy ich wykonania przedstawiono na rys. 3.

Dla wizualizacji systemu wytwarzania na wstępie przygotowano rysunki 2D prezentujące układ hali oraz rozmieszczenia stanowisk produkcyjnych dla wariantów rozwiązań, które były poddane analizie. Odwzorowanie systemu produkcyjnego w wirtualnej rzeczywistości polegało na przygotowaniu trójwymiarowego modelu hali produkcyjnej wraz z istotnymi z punktu prowadzenia badań elementami jej wyposażenia. Do realizacji tego zadania wykorzystano skanowanie laserem 3D oraz gotowe moduły rysunkowe wyposażenia stanowisk. Odwzorowanie elementów wyposażenia ma za zadanie zgromadzenie modeli 3D wszystkich istotnych elementów wyposażenia hali przemysłowej. Szczegółowość modeli powinna być na tyle dokładna, aby odwzorować wszystkie powierzchnie i elementy konstrukcyjne stanowiska, które brane są pod uwagę w analizowanym procesie i na tyle uproszczona, aby ograniczyć czasochłonność i koszty badań. Przyjęto sześć wariantów organizacji miejsca pracy pod względem rozmieszczenia i wyposażenia stanowisk oraz długości dróg transportowych, a następnie przygotowano odpowiadające im modele 3D (przykładowy model zawarto na rys. 4).



Rys. 3. Kolejność wykonywana operacji na stanowiskach montażowych.



Rys. 4. Wizualizacja rozmieszczenia stanowisk roboczych na hali dla wariantu 5.

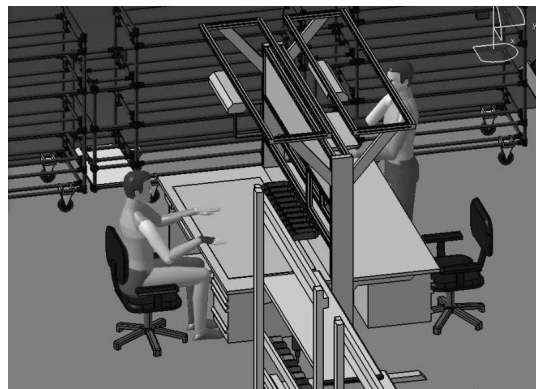
Zaproponowanych 6 wariantów organizacyjnych linii montażowej zostało poddane analizie pod kątem trzech różnych kryteriów stosując różne metody i techniki badawcze oraz korzystając z doświadczenia ekspertów według koncepcji przedstawionej poniżej.

- Kryterium 1: Ergonomia pracy na stanowisku:
 - analiza RULA,
 - analiza NIOSH,
 - ocena punktowa ergonomii pracy na stanowisku dla 9 postaw i sytuacji ergonomicznych.
- Kryterium 2: Koszt wyposażenia:
 - wycena 1,
 - wycena 2,
 - wycena 3.
- Kryterium 3: Wydajność i wykorzystanie elementów linii produkcyjnej:
 - na podstawie symulacji w programie Arena,
 - na podstawie symulacji w programie Analysis 360.

Przyjęcie kryteriów oceny wariantów produkcyjnych jest bardzo ważnym etapem projektu, ponieważ od tego jakie zostaną przyjęte kryteria oraz jakie przydzielone zostaną im wagi zależy, który z wariantów przebiegu procesu produkcyjnego zostanie wskazany jako najlepszy.

Analizę ergonomii pracy przeprowadzono przy pomocy metody RULA zrealizowanej za pomocą modułu do analiz ergonomicznych oprogramowania Delmia (rys. 5). Analizy przeprowadzono zarówno dla prawej jak i lewej strony ciała. Ocenie poddano cztery najczęściej występujące czynności podczas trwania zmiany roboczej:

- montaż na stanowisku roboczym,
- pobieranie komponentów potrzebnych do wykonania operacji na stanowisku,
- odkładania przyniesionego komponentu na stanowisko robocze,
- odkładanie kompletnego produktu na regale.



Rys. 5. Praca na stanowisku – analiza ergonomii.

Tabela 1
Analiza RULA – ocena wariantów.

		W1	W2	W3	W4	W5	W6
Praca na stanowisku	Lewa	4	3	4	3	4	4
	Prawa	3	3	3	3	3	4
Pobieranie komponentu	Lewa	3	2	3	3	3	3
	Prawa	3	2	3	3	3	3
Odkładanie komponentu	Lewa	3	3	3	3	3	3
	Prawa	3	3	3	3	3	3
Odkładanie produktu	Lewa	5	4	5	4	5	4
	Prawa	5	5	5	4	5	4
Razem		29	25	29	26	29	28

Wynikami prowadzonych analiz jest ocena punktowa mieszcząca się w zakresie od 1 do 7, gdzie poszczególne wartości należy interpretować w następujący sposób: 1–2 wynik zadowalający i akceptowalny, 3–4 dopuszczalny, lecz zbadać warunki pracy, 5–6 zbadać warunki pracy i szybko wprowadzić zmiany, 7 – zbadać warunki pracy i natychmiast wprowadzić zmiany.

W wyniku przeprowadzonej analizy najkorzystniejszym z punktu widzenia ergonomii i komfortu pracy okazał się wariant oznaczony jako 2, który uzyskał najniższą wartość sumaryczną 25 (tabela 1).

Dla porównania i szerszego spojrzenia na problem przeprowadzono również ocenę ergonomii pracy na stanowisku metodą NIOSH oraz poprzez oceny punktowe obserwowanych pozycji przy realizowaniu poszczególnych czynności dla 9 sytuacji ergonomicznych [5].

Analiza kosztowa oraz ocena punktowa wariantów została przeprowadzona na podstawie wyceny inwentarza potrzebnego do zbudowania zaproponowanych wariantów organizacyjnych linii montażowej. Rezultaty jednej z takich wycen zamieszczono w tabeli 2 oraz 3.

Biorąc pod uwagę ostatnie z kryteriów (wykorzystanie i obciążenie poszczególnych elementów składowych

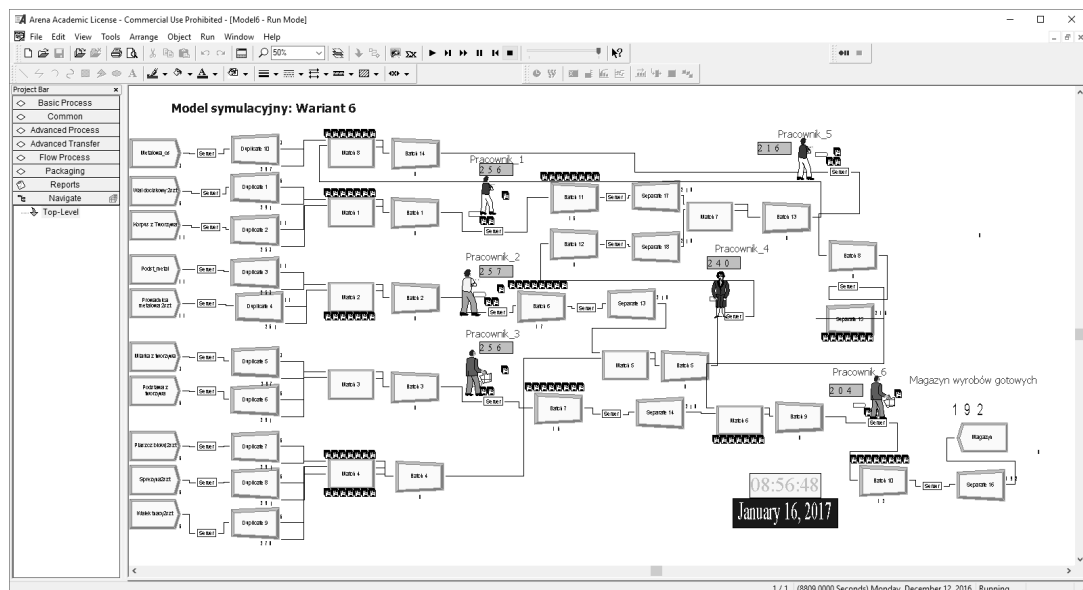
linii montażowej) w rozważaniach wykorzystano badania symulacyjne na modelu komputerowym. W pierwszej kolejności zbudowano model w oprogramowaniu do modelowania i symulacji systemów produkcyjnych Arena (rys. 6).

Tabela 2
Przedziały kosztowe w przyjętej skali punktowej.

Przedział kosztowy		Ocena punktowa
od	do	
23 970 zł	26 480 zł	7
26 480 zł	28 991 zł	6
28 991 zł	31 502 zł	5
31 502 zł	34 012 zł	4
34 012 zł	36 523 zł	3
36 523 zł	39 034 zł	2
39 034 zł	41 545 zł	1

Tabela 3
Punktowa ocena wariantów pod względem kosztów.

	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Wynik	23 970	41 545	28 620	30 010	28 620	37 130
Punktacja	7	1	6	5	6	2



Rys. 6. Model symulacyjny systemu produkcyjnego w oprogramowaniu Arena.

Zbudowanie modelu symulacyjnego wymagało przygotowania następujących danych:

- czasy jednostkowe,
- czasy przygotowawczo-zakończeniowe,
- czasy dostarczenia komponentów na stanowiska robocze.

Drogę, jaką przebywają komponenty na poszczególnych etapach produkcji obliczono na podstawie pomiaru długości ścieżki transportowej zmierzonej na trójwymiarowej wizualizacji pomieszczenia roboczego. Przyjęto, że symulowany czas trwania procesu montażu będzie obejmował 5 dni roboczych po 7,5 godziny. Przyjęto, że liczba pracowników jest równa liczbie stanowisk. Każdy pracownik jest obecny przy stanowisku przez cały czas trwania operacji montażowej. Każdy z pracowników jest odpowiedzialny za dostarczenie wszystkich komponentów potrzebnych do wykonania pracy na swoim stanowisku.

Przebieg każdego z sześciu wariantów procesu montażowego został zasymulowany w programie ARENA, a przykładowe wyniki z raportów symulacyjnych zamieszczono w tabeli 4 oraz 5.

Tabela 4
Wyniki symulacji – liczba wyprodukowanych sztuk.

	Wariant					
	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Wyprodukowano [szt.]	3624	3624	3648	3648	3648	3576

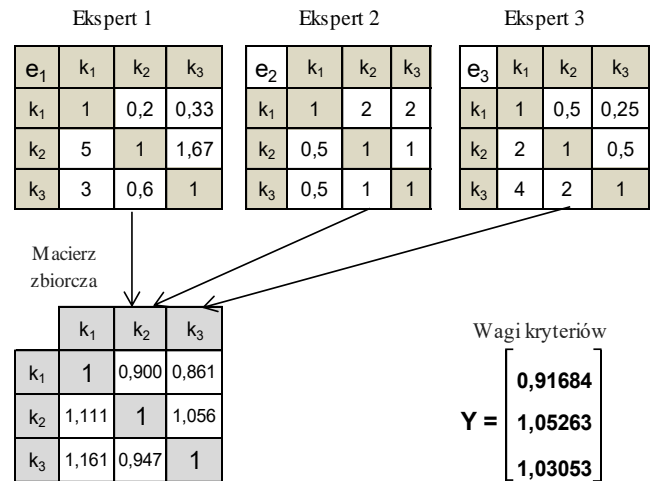
Tabela 5
Wyniki symulacji – obciążenie pracowników.

	Warianty – obciążenie pracownika pracą [%]					
	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Prac. 1	20,36	19,83	20,24	20,06	20,36	20,71
Prac. 2	18,52	17,82	18,41	18,18	18,52	19,46
Prac. 3	18,93	18,67	18,81	18,73	18,84	19,01
Prac. 4	62,32	62,04	62,03	62,09	62,09	63,38
Prac. 5	99,55	99,55	99,54	99,54	99,54	99,54
Prac. 6	14,38	15,18	13,74	14,99	14,43	16,34
Średnio	39,01	38,85	38,80	38,93	38,96	39,74

Podobny tok postępowania zastosowano w przypadku drugiego z ekspertów przeprowadzając porównawczy eksperyment symulacyjny dla tych samych sześciu wariantów, lecz używając, jako narzędzia, oprogramowania Analysis 360. Uzyskane z raportów rezultaty poddano ocenie punktowej (tabela 6).

Uzyskane wyniki badań poddano ocenie wielokryterialnej według punktowej metody Yagera w świetle przyjętych trzech kryteriów oceny.

Pierwszym krokiem w wielokryterialnej ocenie wariantów według Yagera jest utworzenie macierzy ważności poszczególnych kryteriów metodą Saaty'ego. Metoda ta zakłada powołanie zespołu ekspertów, którzy porównują parami poszczególne kryteria definiując ich ważność. Tabele ocen porównawczych kryteriów, tabela zbiorcza ważności kryteriów oraz wyznaczone wagi kryteriów zostały zaprezentowane na rys. 7.



Rys. 7. Ocena ważności kryteriów metodą Saaty'ego.

Ponieważ ocenianie wariantów prowadzone było według różnych kryteriów oraz w różnych jednostkach i skalach ocen, więc konieczne jest sprowadzenie tych ocen do jednego przedziału. Zestawienie wszystkich ocen punktowych wariantów według każdego z kryteriów i dla każdego z ekspertów zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6
Zestawienie ocen punktowych wszystkich wariantów.

Kryteria	Eksperci	Warianty						$S_{ij}(e)$
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	
k_1	e_1	4	7	4	6	4	5	30
	e_2	3	5	4	6	5	7	30
	e_3	1	5	4	7	3	7	27
k_2	e_1	7	1	5	5	5	2	25
	e_2	7	1	6	5	6	2	27
	e_3	7	1	5	6	5	3	27
k_3	e_1	6	6	5	4	7	3	31
	e_2	3	6	7	5	5	1	27

Kolejnym krokiem metody jest sprowadzenie oceny punktowej $S_{ij}(e)$ do wartości unormowanej (tabela 7).

Tabela 7
Tabela ocen unormowanych wariantów.

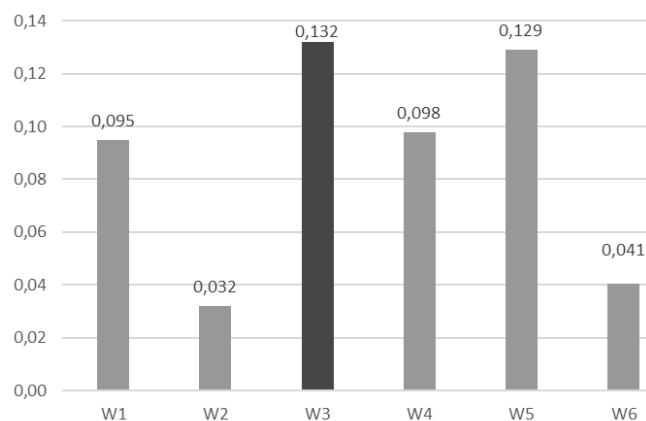
Kryteria	Eksperci	Warianty					
		W1	W2	W3	W4	W5	W6
k_1	e_1	0,13	0,23	0,13	0,20	0,133	0,167
	e_2	0,10	0,17	0,13	0,20	0,167	0,233
	e_3	0,04	0,19	0,15	0,26	0,111	0,259
k_2	e_1	0,28	0,04	0,20	0,20	0,200	0,080
	e_2	0,26	0,04	0,22	0,19	0,222	0,074
	e_3	0,26	0,04	0,19	0,22	0,185	0,111
k_3	e_1	0,19	0,19	0,16	0,13	0,226	0,097
	e_2	0,11	0,22	0,26	0,19	0,185	0,037

W dalszym postępowaniu obliczono łączne oceny unormowane, a na ich podstawie wyznaczono decyzje unormowane poprzez podniesienie każdej z ocen do potęgi odpowiadającej wadze kryterium. Wartości wyznaczonych decyzji unormowanych zamieszczono w tabeli 8.

Tabela 8
Wartości decyzji unormowanych.

Kryteria	Warianty przebiegu procesu					
	W1	W2	W3	W4	W5	W6
k_1	0,110	0,223	0,163	0,249	0,162	0,249
k_2	0,248	0,032	0,186	0,186	0,186	0,078
k_3	0,095	0,130	0,132	0,098	0,129	0,041

Dla każdego z wariantów należy wskazać wartość minimalną, a z nich ta najwyższa wyznacza wariant najlepszy spośród analizowanych.



Rys. 8. Wyniki oceny wielokryterialnej.

Najwyższą wartość uzyskał wariant trzeci i to on zostaje uznany za najlepszy spośród poddanych analizie w ramach zaprezentowanego przykładu projektowego.

4. Podsumowanie

Dzięki analizie ergonomicznej możliwe jest wyszczególnienie czynności, które mogą być uciążliwe oraz niewygodne dla pracowników powodując równocześnie spadek wydajności ich pracy. Uwzględnienie aspektu ergonomii przy projektowaniu gniazd produkcyjnych pozwala budować elastyczne stanowiska pracy przyjazne dla pracowników.

Wizualizacja systemów jest czasochłonna, ale pozwala prowadzić szczegółowe pomiary i badania nad

systemami produkcyjnymi. Modelowanie i symulacja pozwala na wizualizację przebiegu procesów produkcyjnych i szacowanie ich parametrów bez konieczności kosztownego eksperymentowania na rzeczywistych systemach produkcyjnych.

Zastosowanie oceny wielokryterialnej wariantów umożliwia znalezienie kompromisu w poszukiwaniu rozwiązania, które jest korzystne ze względu na wiele kryteriów z uwzględnieniem ich ważności.

Literatura

- [1] Dima I., Man M., *Modelling and Simulation in Management*, Springer, Switzerland, 2015.
- [2] Kelton W., Sadowski R., Sadowski D., *Simulation with Arena*, WCB/McGraw-Hill, 2007.
- [3] Knosala R., Boratyńska-Sala A., Jurczyk-Bunkowska M., Moczala A., *Zarządzanie innowacjami*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2014.
- [4] Kukla S., *Multi-criterion assessment of different variants of casts manufacturing processes*, Archives of Foundry Engineering, 14, 3, 47–50, 2014.
- [5] Kukla S., *Safety and ergonomics of iron casts manufacturing*, Spektrum, 1, 106–111, 2014.
- [6] Kurczyk D., *Racjonalizacja produkcji w systemach produkcyjnych z zastosowaniem komputerowej wirtualizacji procesów*, Praca doktorska, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Bielsko-Biała, 2018.
- [7] Maciąg A., Piertróń R., Kukla S., *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2013.
- [8] Matuszek J., Kukla S., *Analysis of foundry production systems on the basis of modelling and simulation*, Acta Mechanica Slovaca, 13, 2, 106–111, 2009.
- [9] Płonka S., Ogiński L., *Podstawy eksperymentalnej optymalizacji parametrycznej*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 2004.
- [10] Saaty T., *The Analytic hierarchy processes*, McGraw-Hill, New York, 1980.