

RACJONALIZACJA ERGONOMICZNA WYBRANEGO STANOWISKA PRACY FIZYCZNEJ METODĄ YAGER'A

Józef MATUSZEK, Kinga BYRSKA

Streszczenie: W artykule przedstawiono postępowanie zmierzające do wyłonienia właściwej kolejności wdrożenia rozważanych wariantów poprawy warunków pracy na wybranym przykładowym stanowisku roboczym. Przedstawiono przyjęte kryteria, wprowadzono ograniczenia związane z określaniem różnych wariantów rozwiązań. Dokonano określenia obszaru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto z wykorzystaniem metody Yagera.

Słowa kluczowe: ergonomia, kształtowanie stanowiska pracy, metoda Yagera

1. Wprowadzenie

Optymalizacja ergonomiczna procesów wytwarzania może być prowadzona w trakcie projektowania stanowiska – jest to wówczas optymalizacja lub projektowanie ergonomiczne koncepcyjne. Celem pracy jest przedstawienie przykładowego algorytmu optymalizacji wielokryterialnej struktury realizowanego procesu wytwarzania (ergonomiczne projektowanie korekcyjne) na przykładzie stanowiska montażu przewodów z tworzyw sztucznych z uwzględnieniem kryteriów jakości ergonomicznej, czasu trwania cyklu produkcyjnego co przedkłada się na efektywność ekonomiczną procesu, kosztu wdrożenia wybranych rozwiązań oraz ograniczeń w terminie najszybszego możliwego wdrożenia planowanych rozwiązań [1].

W przedstawionej w artykule przykładowej optymalizacji wielokryterialnej struktury i parametrów przebiegów realizowanych procesów wykonywane są dwa etapy [2]:

- wyznaczenie zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto,
- postępowanie w celu wyboru rozwiązania najlepszego.

Zadanie polega na znalezieniu takiego wariantu ze zbioru wariantów procesu, który najlepiej spełnia wszystkie przyjęte kryteria. Poszczególnym kryteriom przypisuje się wagi, które są współrzędnymi wektora własnego, odpowiadającego maksymalnej wartości własnej wektora λ_{max} . Współrzędne te muszą dodatkowo spełniać warunek, by ich suma była równa liczbie przyjętych do oceny wariantów kryteriów. Wówczas decyzja przyjmuje następującą postać zgodnie z wzorem 1 [2]:

$$D = K_1^{w_1} \cap K_2^{w_2} \cap K_3^{w_3} \cap K_4^{w_4} \quad (1)$$

gdzie:

- K_1 - kryterium oceny rozwiązania,
- w_1 - waga ważności kryterium.

Wariantem najbardziej preferowanym jest ten wariant, któremu odpowiada największy składnik decyzji optymalnej [2].

2. Warianty poprawy ergonomicznej dla analizowanego stanowiska

Poszczególne elementy optymalizacji w zagadnieniu racjonalizacji ergonomicznej stanowiska do termoformowania obejmować będą dane wejściowe, którymi są:

- liczba wariantów procesu wytwarzania,
- liczba kryteriów,
- elementy macierzy ważności poszczególnych kryteriów,
- elementy tablicy $C = [b_{st}]$ będące unormowanymi ocenami s-tego wariantu według t-go kryterium.

Wprowadzony katalog wariantów ergonomicznego kształtowania stanowiska do termoformowania przewodów ma charakter otwarty. Jest on reprezentowany przez zestawienie podane w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wariantów poprawy ergonomicznej, opracowanie własne

Rozwiązanie organizacyjne		
zespół	RZ1	samodzielna obsługa w ciągu dnia różnych maszyn o różnym poziomie uciążliwości pracy
	RZ2	praca zespołowa chacku-chacku, jeśli jest to możliwe to podążanie za wyrobem do końca procesu technologicznego
	RZ3	odpowiedni dobór zespołów pracujących wspólnie
metoda	RM1	zmienne mocowanie - od prawej strony, wciskając przewód w kanał lewą ręką; od lewej strony, wciskając przewód prawą ręką - równe obciążenie kończyn
	RM2	zmniejszenie tarcia sprężyny w przewodzie, dobór odpowiedniej substancji chemicznej nie pogarszającej parametrów produkcyjnych (obecnie stosowany jest silikon w sprayu)
	RM3	szkolenia przypominające najlepszą dostępną metodę pracy, wymiana doświadczeń pomiędzy operatorami
	RM4	zmniejszenie stresu, kolejne stanowiska mają krótszy czas montażowy, system ssący, operator nie nadąża z produkcją na potrzeby montażu, wyrównanie czasu cyklu poprzez zwiększenie zakresu operacji montażowych
proces	RP1	zmniejszenie normy produkcyjnej, zmniejszenie wydatku energetycznego
	RP2	klimatyzacja przestrzeni pracy operatora, stabilne środowisko pracy
	RP3	częstszy remont form - wygładzenie powierzchni, łatwiejsze zakładanie przewodów
	RP4	formy powinny znajdować się blisko maszyn które je stosują – jeśli jest możliwe to wymagane jest takie składowanie w magazynach ani minimalizować ich transport do maszyn
	RP5	silikon w formie pistoletu
	RP6	wstępne wygrzewanie przewodów o dużych średnicach by łatwiej się je wkładało do formy
	RP7	łatwiejsze wkładanie przewodu do kanału,
	RP8	wkładanie przewodu bardziej od góry niż w bok
	RP9	dozownik silikonu w pobliżu dłoni pracownika. Jeśli jest to możliwe mocowany np. opaską do rękawiczki itp.

Rozwiązania techniczne		
organizacja stanowiska	RO1	zmienna wysokość podłoża
	RO2	pojemniki na przewody - kolorowo znaczone, ustawiany kąt, przesuwne, na poziomie ręki, wyposażone w kółka jezdne i hamulec oraz stopkę (mniejsze ryzyko przewrócenia się)
	RO3	powiększenie przestrzeni roboczej (obecnie jest zbyt ciasno), ryzyko urazu
	RO4	rozmieszczenie komponentów maszyny zgodnie z sekwencją zakładania przewodów do maszyny, zwłaszcza w przypadku gdy przewodów mocowanych jest kilka rodzajów
Stanowisko pracy	RT1	zmienna wysokość formy, zmiana kąta mocowania
	RT2	zwiększenie przestrzeni pomiędzy dolnym elementem konstrukcji maszyny - brak miejsca na wsunięcie stóp osoby która chce zbliżyć się do samej maszyny
	RT3	hałas alarmu stanu maszyny, zmniejszenie głośności
	RT4	standaryzacja maszyn - łatwiejsza praca na różnych typach i gabarytach maszyny jeśli metoda pracy nie musi się zmieniać
	RT5	dbałość o kleszcze mocujące formę do ramy maszyny, niedopuszczalne jest, by forma poruszała się w trakcie pracy - nie była usztywniona; kleszcze powinny być przypisane do maszyny - łatwiej panować nad tym które się zgubiły lub zniszczyły
	RT6	licznik nie tylko wykonanych cykli w ogóle, możliwość zapisywania swoich ustawień, obecnie operator manualnie zlicza produkcję, powinno rozliczać ile cykli na której formie (jak 2 lub 3 formy będą to jest to istotne w obliczeniach)
	RT7	licznik dla operatora zlokalizowany przy przycisku start cyklu - można kontrolować na bieżąco stan produkcji
	RT8	lokalizacja elementów sterujących standardowa we wszystkich maszynach tego typu
	RT9	zmniejszenie wagi formy - zmiana materiału na lżejszy
	RT10	zwiększenie automatyzacji procesu. Zmiana konstrukcji całej maszyny - ergonomia koncepcyjna
	RT11	zmiana kształtu korpusu maszyny na bardziej ergonomiczny
	RT12	zmiana wybranych komponentów maszyny
środki ochrony	RŚ1	środki ochrony indywidualnej - manualne ściśle dolegające rękawice, nieprzemakalne, odpowiednie okulary, antypara
	RŚ2	bariery z przezroczystego poliwęglanu w newralgicznych elementach maszyny ograniczające rozrzut pary w trakcie wykonywania pracy
	RŚ3	ergonomiczne, wygodne obuwie ochronne
	RŚ4	odpowiednie odseparowanie nagrzewających się elementów maszyny - zbiornik na wodę po wykonaniu cyklu, izolacja to mniejsze straty ciepła
	RŚ5	naparstek na ochronę kciuka z materiału odpornego na ścieranie, a jednocześnie elastycznego
	RŚ6	opaska na nadgarstek
	RŚ7	w porze letniej w przypadku wysokich temperatur, przerwy dodatkowe
	RŚ8	podpora ciała dostępna na stanowisku pracy, siedzisko w trakcie przerw

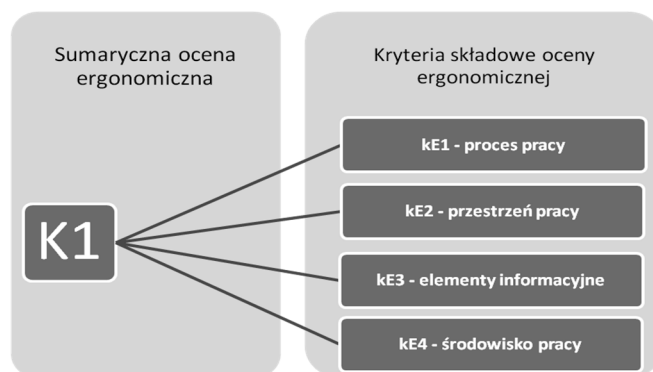
Po utworzeniu zbioru decyzji pierwszeństwo mają te decyzje spośród wzajemnie się wykluczających, które uzyskały wyższą najmniejszą składową oceny. Zbiór ograniczeń wynikających z możliwości ekonomicznych, organizacyjnych organizacji oraz związanych z dostępnością proponowanych rozwiązań, dostępnością wiedzy technicznej wymaganej do zastosowania rozwiązania oraz z polityki bezpieczeństwa i higieny pracy w przedsiębiorstwie określono przez oznaczenie – O1, O2, O3, O4.

- O1 – rozwiązanie nie może spowodować wydłużenia czasu trwania cyklu produkcyjnego,
- O2 – przyjęte do wdrożenia rozwiązania muszą być możliwe do wprowadzenia w okresie krótszym niż 5 lat,
- O3 – Sumaryczny komfort ergonomiczny musi się poprawić o minimum jeden punkt,
- O4 – maksymalny koszt wdrożenia rozwiązania nie może przewyższyć kosztu 10 jednostek,

Zbiór kryteriów doboru rozwiązań ergonomicznych określono nazwą – K1, K2, K3, K4. W trakcie optymalizacji zastosowano jedno kryterium zastępcze – sumaryczną ocenę ergonomiczną bazującą na arkuszu oceny ergonomicznej. $K1 = \{kE1, kE2, kE3, kE4\}$. Składowe oceny zawiera tabela 2 oraz rysunek 1.

Tabela 2 - Składowe kryterium oceny ergonomicznej, opracowanie własne

K1	Sumaryczna ocena ergonomiczna (składająca się z podkryteriów kE1, kE2, kE3, kE4)
K2	Czas cyklu produkcyjnego
K3	Koszt wdrożenia rozwiązania ergonomicznego
K4	Czas do wdrożenia przyjętego rozwiązania ergonomicznego



Rys. 1 - Kryterium ergonomiczne i podkryteria, opracowanie własne

Możliwe oceny przyjęte dla każdego z kryterium to:

- Czas wdrożenia przyjętego rozwiązania, oznaczenie 0 pkt oznacza natychmiastową możliwość wprowadzenia rozwiązania, 1 pkt – wymagany czas na wdrożenie rozwiązania to 0 – 0,5 roku; 2 pkt – wymagany czas 0,5–1 roku, 3 pkt – 1–2 lat; 4 pkt – 2–5 lat, 5 pkt – powyżej 5 lat – kryterium K2.
- Czas trwania cyklu produkcyjnego, za który uznano dla standardowego przewodu termo formowanego czas równy 2,5 minuty. Skrócenie czasu cyklu oznaczane jest

jako liczba ze znakiem dodatnim, wydłużenie cyklu uzyskuje oceny ze znakiem ujemnym – K3.

- Koszt wdrożenia pojedynczego rozwiązania, szacowany czas jest podany w wyniku analizy i doświadczeń ekspertów, jest określany jako koszt organizacji na wszystkie stanowiska do termoformowania objęte doskonaleniem ergonomicznym, wyrażony jest w jednostkach kosztowych – K4.

Dokonując ocenę metodą Yager’a uwzględniono możliwe 40 wariantów poprawy ergonomicznej (patrz tabela 1) oraz 4 kryteria główne (patrz tabela 2).

3. Tablica ważności kryterium

Macierz B wyznacza się metodą Saaty’ego. Każde kryterium zostało ocenione i stworzono macierz ważności kryteriów $W = [w_{ij}]$ zgodnie z metodą Saaty’ego polegającą na porównaniu kolejnych par kryteriów. Zakres skali ustala ekspert wiodący. Przyjęto skalę $\langle 0; 5 \rangle$. Poszczególne wartości macierzy $W = [w_{ij}]$ przyjęto następująco:

- $w_{ij} = 1$ gdy K_i i K_j są równie ważne,
- $w_{ij} = 2$ gdy K_i jest nieco ważniejsze od K_j ,
- $w_{ij} = 3$ gdy K_i jest ważniejsze od K_j ,
- $w_{ij} = 4$ gdy K_i jest wyraźnie ważniejsze od K_j ,
- $w_{ij} = 5$ gdy K_i jest absolutnie ważniejsze od K_j .

Ponadto przyjmuje się zgodnie z wzorem (2), że:

$$w_{ij} = \left[\frac{1}{w_{ji}} \right] \quad (2)$$

oraz dla $i=j$ wartość $w_{ij} = 1$.

Dla 5 ekspertów tworzenie macierzy w_{ij} przebiegało następująco:

- każdy z 5 ekspertów utworzył swoją własną, indywidualną macierz w_{ij} - Tabela 3,
- z uzyskanych macierzy cząstkowych utworzono zbiorczą macierz ważności kryteriów - Tabela 4.

Tabela 3. Oceny ważności kryterium według poszczególnych ekspertów, opracowanie własne

Ważność kryterium $K_i \backslash K_j$		Sumaryczna ocena ergonomiczna	Czas cyklu produkcyjnego	Koszt wdrożenia rozwiązania ergonomicznego	Czas do wdrożenia przyjętego rozwiązania ergonomicznego
Ekspert 1					
1	Sumaryczna ocena ergonomiczna	1	0,25	2	0,5
2	Czas cyklu produkcyjnego	4	1	4	4
3	Koszt wdrożenia rozwiązania ergonomicznego	0,5	0,25	1	0,5
4	Czas do wdrożenia przyjętego rozwiązania ergonomicznego.	2	0,25	2	1

Ekspert II					
1	Sumaryczna ocena ergonomiczna	1	0,33	3	0,33
2	Czas cyklu produkcyjnego	3	1	4	4
3	Koszt wdrożenia rozwiązania ergonomicznego	0,33	0,25	1	1
4	Czas do wdrożenia przyjętego rozwiązania ergonomicznego.	3	0,25	1	1
Ekspert III					
1	Sumaryczna ocena ergonomiczna	1	0,25	4	0,25
2	Czas cyklu produkcyjnego	4	1	4	4
3	Koszt wdrożenia Rozwiązania ergonomicznego	0,25	0,25	1	0,5
4	Czas do wdrożenia przyjętego rozwiązania ergonomicznego	4	0,25	2	1
Ekspert IV					
1	Sumaryczna ocena ergonomiczna	1	0,25	2	0,5
2	Czas cyklu produkcyjnego	4	1	2	4
3	Koszt wdrożenia Rozwiązania ergonomicznego	0,5	0,5	1	0,5
4	Czas do wdrożenia przyjętego rozwiązania ergonomicznego	2	0,25	2	1
Ekspert V					
1	Sumaryczna ocena ergonomiczna	1	1	2	0,5
2	Czas cyklu produkcyjnego	1	1	4	4
3	Koszt wdrożenia Rozwiązania ergonomicznego	0,5	0,25	1	1
4	Czas do wdrożenia przyjętego rozwiązania ergonomicznego	2	0,25	1	1

Tabela 4. Zbiorcza macierz ważności kryteriów, opracowanie własne

Ważność kryterium	Ocena ergonomiczna	Czas cyklu produkcyjnego	Koszt wdrożenia rozwiązania	Czas do wdrożenia rozwiązania
Sumaryczna ocena ergonomiczna	1	0,417	2,600	0,417
Czas cyklu produkcyjnego	2,400	1	3,600	4,000
Koszt wdrożenia rozwiązania ergonomicznego	0,385	0,278	1	0,700
Czas do wdrożenia przyjętego rozwiązania ergonomicznego	2,400	0,250	1,429	1

Dla macierzy ważności kryteriów szuka się wektora własnego Y , który spełnia równanie macierzowe (3):

$$B * Y = \lambda_{max} * Y \quad (3)$$

gdzie:

B – zbiorcza macierz ważności kryteriów

Y – wektor własny, który z powyższym równaniu stanowi macierz kolumnową

λ_{max} – skalar oznaczający maksymalną wartość własną macierzy B .

$$\begin{array}{cccccccc}
 1 & 0,417 & 2,600 & 0,417 & \lambda_{max} & 0 & 0 & 0 \\
 2,400 & 1 & 3,600 & 4,000 & 0 & \lambda_{max} & 0 & 0 \\
 0,385 & 0,278 & 1 & 0,700 & 0 & 0 & \lambda_{max} & 0 \\
 2,400 & 0,250 & 1,429 & 1 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{max} \\
 \\
 1 - \lambda_{max} & 0,417 & 2,600 & 0,417 & & & & \\
 2,400 & 1 - \lambda_{max} & 3,600 & 4,000 & & & & \\
 0,385 & 0,278 & 1 - \lambda_{max} & 0,700 & & & & \\
 2,400 & 0,250 & 1,429 & 1 - \lambda_{max} & & & &
 \end{array}$$

Wektorem własnym macierzy nazywamy każdy niezerowy wektor Y , który zachowuje kierunek po wykonaniu mnożenia przez tę macierz. Wielkość λ jest wartością własną macierzy B odpowiadającą wektorowi własnemu Y . Każdy wektor własny ma odpowiadającą wartość własną, oznaczoną $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$. Wartości własne danej macierzy są określone jednoznacznie. Zbiór wszystkich wartości własnych macierzy nazywana jest spektrum tej macierzy[4].

Szukany jest taki wektor dla którego powyższe równanie jest spełnione dla możliwie największej liczby $\lambda = \lambda_{max}$. Szukany wektor posiada tyle współrzędnych ile ustanowiono kryteriów. Współrzędne te spełniają warunek, aby ich suma wynosiła wartość równą przyjętej liczbie kryteriów. Współrzędne wektora własnego są wagami dla przyjętych kryteriów i oznaczane są jako $w_1, w_2 \dots$. Waga oznacza ważność odpowiadającego jej kryterium. Dla macierzy B szukano wektora własnego wprowadzając do systemu Wolfram (dostęp online). Otrzymano wektory własne:

$$v_1 \approx (-0,300671, -0,861873, -0,184943, -0,364098)$$

$$v_2 \approx (-0,288472+0,198118i, -0,799801+0,1i, -0,0998712+0,11227i, 0,135098-0,44387i)$$

$$v_3 \approx (-0,288472-0,198118i, -0,799801+0,1i, -0,0998712-0,11227i, 0,135098+0,44387i)$$

$$v_4 \approx (-0,0735629, -0,969473, 0,159648, 0,170946)$$

Ustalono wartości wektorów własnych oraz przedstawiono ich moduły na ilustracji - Rys. 2.

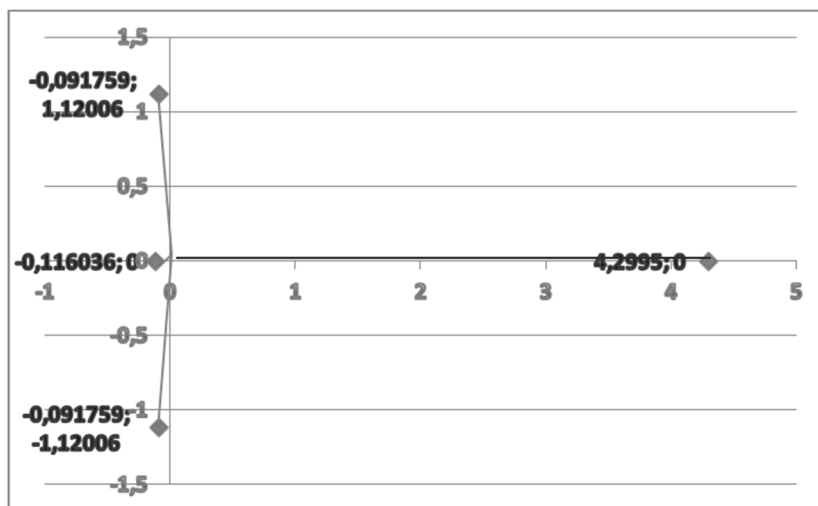
$$\lambda_1 \approx 4,29955$$

$$\lambda_2 \approx -0,091759 + 1,12006i$$

$$\lambda_3 \approx -0,091759 - 1,12006i$$

$$\lambda_4 \approx -0,116036$$

gdzie λ_{max} - jest skalarom oznaczającym maksymalną wartość własną B.



Rys. 2. Moduły wartości wektorów własnych

Wartość własną ustala się określając moduły poszczególnych liczb zespolonych. Maksymalna wartość tzn. λ_{max} wynosi 4,29955. Sprawdzono warunek spójności $\frac{\lambda_{max-k}}{k-1} < 0,1$, tj. $\frac{4,29955-4}{3} < 0,1$, ponieważ $0,09985 < 0,1$, warunek spełniono. Z metody Saaty'ego wynika, że zadowalające spełnienie warunku spójności zapewnia wystarczającą adekwatność tej metody, w której występują wartości i wektory własne macierzy B.

Utworzenie macierzy, gdzie wartości 1 zastąpiono wartością $1-\lambda_{max}$:

$$\begin{matrix} 1-\lambda_{max} & 0,417 & 2,600 & 0,417 \\ 2,400 & 1-\lambda_{max} & 3,600 & 4,000 \\ 0,385 & 0,278 & 1-\lambda_{max} & 0,700 \\ 2,400 & 0,250 & 1,429 & 1-\lambda_{max} \end{matrix}$$

Otrzymano:

$$\begin{matrix} -3,29955 & 0,417 & 2,600 & 0,417 \\ 2,400 & -3,29955 & 3,600 & 4,000 \\ 0,385 & 0,278 & -3,29955 & 0,700 \\ 2,400 & 0,250 & 1,429 & -3,29955 \end{matrix}$$

Rozwiązanie układu równań z 4 niewiadomymi

$$\begin{cases} -3,29955y_1 + 0,416667y_2 + 2,60000y_3 + 0,416667y_4 = 0 \\ 2,40000y_1 - 3,29955y_2 + 3,60000y_3 + 4,00000y_4 = 0 \\ 0,38462y_1 + 0,27778y_2 - 3,29955y_3 + 0,70000y_4 = 0 \\ 2,40000y_1 + 0,25000y_2 + 1,42857y_3 - 3,29955y_4 = 0 \end{cases}$$

i wyznaczenie w taki sposób aby zgodnie z wzorem (4):

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 = k = 4 \quad (4)$$

Obliczono, iż:

$$0,82660y_4 + 2,36899y_4 + 0,50910y_4 + 1y_4 = 4$$

$$4,70469y_4 = 4$$

$$y_4 = 0,85021$$

Wartość tę podstawiono do równania i uzyskano współrzędne wag kryteriów:

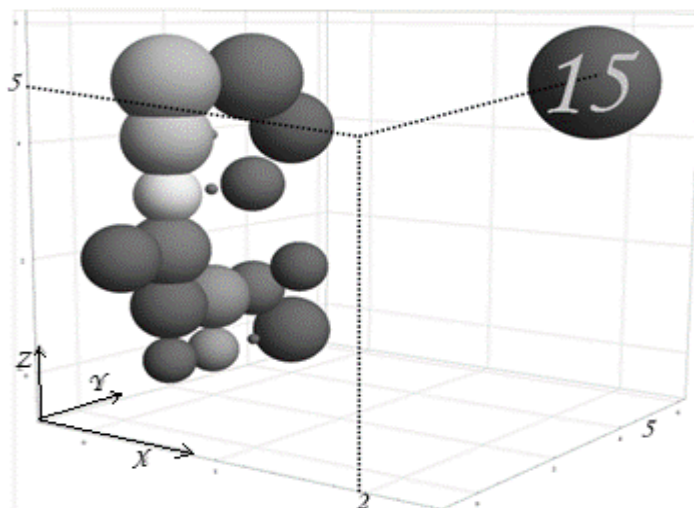
$$0,82660 * 0,85021 + 2,36899 * 0,85021 + 0,50910 * 0,85021 + 0,85021 * 0,85021 = 4$$

Kolejne wartości odpowiadają wadze kryteriów, które oznaczono symbolami w_1, w_2, w_3, w_4 :

$$\begin{cases} 0,70279 \text{ (dla } w_1) \\ 2,01414 \text{ (dla } w_2) \\ 0,43284 \text{ (dla } w_3) \\ 0,85021 \text{ (dla } w_4) \end{cases}$$

4. Oceny poszczególnych wariantów

Dla kryterium jakości ergonomicznej przyjęto możliwość oceny wariantu od 0 – 5. Wartość przyznana 5 oznaczała dużą poprawę ergonomiczną, 0 brak poprawy. Wdrożenie otrzymało możliwy zakres oceny od 0 do 5, gdzie początkowo ocena 0 oznaczała brak ograniczeń czasowych wynikających np. z zawartych umów o współpracy czy ograniczeń procesowych by dane rozwiązanie wdrożyć, natomiast wartość największa 5 oznaczała największą perturbację w możliwości wdrożenia rozwiązania. Ostatnim rozpatrywanym kryterium był koszt wdrożenia rozwiązania. Również dla ułatwienia i intuicyjnego oceniania kosztów wdrożenia przyjęto skalę, w której 0 – oznacza brak kosztów lub minimalne koszty, a wartość 15 maksymalne koszty. Zbiór rozwiązań tak określonych reprezentuje tzw. wykres bąbelkowy – rysunek 3.



Rys. 3 - Reprezentacja graficzna ocen poszczególnych wariantów, opracowanie własne

Na rys. 3 wielkość bąbelka – określa koszt realizacji, oś X – czas cyklu, pominięto rozwiązania wydłużające czas, oś Y – poprawa komfortu ergonomicznego, oś Z – możliwy termin wprowadzenia rozwiązania. Rozwiązanie idealne wizualizowane jest sferą o

najmniejszym promieniu, o najmniejszej wartości na osi Z (od razu możliwy do wdrożenia), największych wartościach osi X (najkrótszy czas cyklu) i największej wartości osi Y (największa poprawa komfortu ergonomicznego).

Ocena ergonomiczna stanowi sumę ocen jej składowych. W metodzie Yager'a należy wartości ocen sprowadzić do formy maksymalizacji wszystkich kryteriów dlatego kryteria minimalizowane „wdrożenie” przemnożono przez stałą -1 oraz dodano do każdej oceny +5. Kryterium kosztu zostało w ten sam sposób sprowadzone do kryterium maksymalizowanego.

5. Tablica ocen unormowanych

Tablica zawierająca wartości bazowe dla poszczególnych kryteriów poddaje się normalizacji i tworzy się tablicę $N = [n_{ij}]$ unormowanych ocen i-tego wariantu według j-kryterium. Elementy tablicy normuje się poprzez określenie i-tego wariantu, według j-tego kryterium, podanego przez e-tego eksperta, czyli określa stopień przynależności i-tego wariantu do zbioru preferowany przez j-te kryterium. Z ocen podanych przez e-tego eksperta tworzonych jest tyle sum, ile przyjętych zostało kryteriów. Następnie bezpośrednio sprowadza się oceny punktowe do wartości unormowanej poprzez podzielenie danej oceny punktowej przez sumę ocen punktowych przyjętych dla danego kryterium przez e-tego eksperta. Uzyskuje się wówczas wartości należące do przedziału zamkniętego $\langle 0,1 \rangle$. Suma wartości ocen unormowanych wynosi 1. W przypadku gdy występuje więcej ocen bazowych ekspertów tworzy się macierz uśrednień ocen podanych przez poszczególnych ekspertów, według zależności (5):

$$c_{ij} = \frac{1}{p} \sum_{e=1}^p c_{ij}(e) \quad (5)$$

gdzie: p – liczba ekspertów

6. Decyzje unormowane

Kolejny krok to utworzenie decyzji unormowanych poprzez podniesienie każdego składnika ocen unormowanych do potęgi równej odpowiedniej wadze. Decyzja optymalna w metodzie Yagera jest decyzją typu minimum. Decyzje optymalne to te o najmniejszych składnikach, opisuje je wzór (6):

$$D_i = \min_j c_{ij}^{w_j} \quad (6)$$

Wariantem najbardziej preferowanym jest ten, któremu odpowiada największy składnik decyzji optymalnej (7) – Tabela 5:

$$a_{\text{opti}} = \max_i D_i \quad (7)$$

Tabela 5. Decyzje unormowane, opracowanie własne

wariant	$K1^{w_1}$	$K2^{w_2}$	$K3^{w_3}$	$K4^{w_4}$	$\min_j c_{ij}^{wj}$
RT10	0,112476	0,005533	0	0	0
RP5	0,096151	0,000216	0,204041	0,024144	0,000216
RO3	0,07855	0,00353	0,254533	0,01897	0,00353
RT1	0,07855	0,00353	0,126823	0,017246	0,00353
RZ1	0,07855	0,001978	0,254533	0,025869	0,001978
RP2	0,07855	0,001978	0,171197	0,022419	0,001978
RO2	0,07855	0,001978	0,231098	0,022419	0,001978
RT9	0,07855	0,001978	0	0,012072	0
RZ2	0,07855	0,000874	0,171197	0,025869	0,000874
RM4	0,07855	0,000874	0,126823	0,025869	0,000874
RP3	0,07855	0,000874	0,231098	0,022419	0,000874
RP4	0,07855	0,000874	0,126823	0,025869	0,000874
RO1	0,07855	0,000874	0,231098	0,020695	0,000874
RT5	0,07855	0,000874	0,254533	0,024144	0,000874
RZ3	0,07855	0,000216	0,254533	0,024144	0,000216
RM1	0,07855	0,000216	0,254533	0,025869	0,000216
RP8	0,07855	0,000216	0,126823	0,017246	0,000216
RP9	0,07855	0,000216	0,204041	0,024144	0,000216
RO4	0,07855	0,000216	0,231098	0,025869	0,000216
RT2	0,07855	0,000216	0,204041	0,022419	0,000216
RT3	0,07855	0,000216	0,254533	0,025869	0,000216
RT4	0,07855	0,000216	0,204041	0,025869	0,000216
RT6	0,07855	0,000216	0,171197	0,022419	0,000216
RT7	0,07855	0,000216	0,204041	0,022419	0,000216
RT8	0,07855	0,000216	0,204041	0,025869	0,000216
RT11	0,07855	0,000216	0	0,012072	0
RT12	0,07855	0,000216	0	0,012072	0
RS1	0,07855	0,000216	0,231098	0,022419	0,000216
RS3	0,07855	0,000216	0,231098	0,025869	0,000216
RS4	0,07855	0,000216	0,204041	0,01897	0,000216
RS5	0,07855	0,000216	0,204041	0,022419	0,000216
RS6	0,07855	0,000216	0,254533	0,024144	0,000216
RS8	0,07855	0,000216	0,231098	0,020695	0,000216
RS2	0,07855	0	0,204041	0,020695	0
RS7	0,059074	0,000216	0,254533	0,017246	0,000216
RM2	0,059074	0	0,171197	0,022419	0
RM3	0,036294	0,001978	0,254533	0,024144	0,001978
RP7	0,036294	0,001978	0,126823	0,01897	0,001978
RP1	0,036294	0,000874	0,254533	0,020695	0,000874
RP6	0	0	0	0,017246	0

$$\max_i D_i \quad 0,00353$$

Decyzje najbardziej oczekiwane to: R03, RT1, RZ1, RP2.

7. Wnioski

Zastosowanie metody Yagera pozwoliło na uszeregowanie bardzo dużej ilości możliwych rozwiązań skutkujących w różnym zakresie poprawą ergonomii pracy i innych kluczowych kryteriów takich jak czas cyklu produkcyjnego, możliwy czas wdrożenia

analizowanego rozwiązania i koszty wdrożenia analizowanego rozwiązania. Szeregowanie to utworzyło ciąg rozwiązań od tych o największym skutku wdrożenia do tych, których odczuwany skutek będzie najmniejszy, a dla których szacowane koszty będą największe.

Pierwszeństwo przyznano temu rozwiązaniu spośród rozwiązań konfliktowych, które uzyskało większy składnik związany z decyzją optymalną. Kluczową rolę w przeprowadzanej analizie ma wiedza ekspertów, ich doświadczenie i prawidłowe decyzje podejmowane w ciągu cyklu analiz – zarówno na etapie oceny ważności kryterium metodą Saatiego jak i w trakcie oceny rozwiązań właściwych.

Wprowadzenie kryteriów ograniczających na wyższym poziomie skali punktowej mogło by pozwolić, w razie zaistnienia potrzeby na uproszczenie etapu obliczeń i wyselekcjonowanie mniejszego zbioru rozwiązań. Zastosowanie metody Yagera może być przydatne w praktyce produkcyjnej w trakcie planowania inwestycji w organizacjach. Metoda nie wprowadza ograniczeń w liczbie rozpatrywanych kryteriów, co czyni ją elastyczną i pozwala na dostosowanie do potrzeb organizacji.

Literatura

1. Lorek R.: Optymalizacja wielokryterialna procesów wytwarzania rotorów przędzarek, praca doktorska, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała, 2009.
2. Ogiński L., Płonka S., Wybór optymalnego wariantu procesu wytwarzania wrzeciona przędzarki obrączkowej, Multicriterial Optimisation of the Manufacturing Process of a Spindle Working in a Ring Spinning Frame. FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2014; 22, 6(108): 51-58.

Prof. dr hab. inż. Józef MATUSZEK
Mgr inż. Kinga BYRSKA
Katedra Inżynierii Produkcji
Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej
43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2
tel./fax: (0-33) 827 93 49
e-mail: jmatuszek@ath.bielsko.pl,
kbyrska@ath.bielsko.pl