

IMPLEMENTACJA ALGORYTMU SELEKCJI PRZEDSIĘBIORSTW DO WSPÓLNEJ REALIZACJI ZAMÓWIEŃ W MODELU SYMULACYJNYM

Joanna GĄBKA

Streszczenie: W artykule przedstawiono dwa podejścia dotyczące zagadnienia doboru przedsiębiorstw do realizacji zamówień/projektów w kooperacji. Dokonano analizy tych rozwiązań i na ich bazie wygenerowano nowe. Działanie opracowanego algorytmu zweryfikowano poprzez implementację w modelu symulacyjnym. Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki systemów wspomagających wspólną działalność wielu podmiotów. Kolejne sekcje prezentują trzy podejścia związane z problemem selekcji podmiotów do działań kooperacyjnych. Sekcja 6 prezentuje wyniki implementacji algorytmu do programu symulacyjnego. W części końcowej zawarto wnioski i podsumowanie.

Słowa kluczowe: kooperacja, model matematyczny, model symulacyjny.

1. Wstęp

W celu uzyskania lepszej pozycji na rynku współczesne przedsiębiorstwa nawiązują między sobą ścisłą współpracę tworząc sieci wytwórcze, klastry i inne struktury dedykowane działalności kooperacyjnej. Dzięki temu wzmacniają swój potencjał, ponieważ w grupie dysponują większym zbiorem środków produkcji, kapitału i zasobów ludzkich, [1]. Nowe struktury biznesowe powstają nie tylko w kraju, ale na całym świecie. Ta tendencja przyczyniła się do powstania kolejnych wyzwań w dziedzinie zarządzania. Zaistniało zapotrzebowanie na nowe oprogramowanie, a wraz z nim potrzeba opracowania algorytmów wspomagających procesy decyzyjne w strukturach wielopodmiotowych. Kluczowym czynnikiem sukcesu w przedsięwzięciach kooperacyjnych jest właściwy dobór uczestników. Jednostki wytwórcze przypisane do realizacji poszczególnych zadań powinny spełniać założony zestaw kryteriów tak aby ich wkład w realizację zamówienia czy projektu można było zintegrować i spełnić wymagania określone przez klienta. Znaczna liczba przedsiębiorstw należących do klastrów/ sieci wytwórczych posiada takie same lub podobne kompetencje. Należy zatem opracować mechanizmy, które pozwolą za każdym razem w krótkim czasie wskazać najlepszą w danym przypadku grupę wykonawców zamówienia/projektu. Selekcji przedsiębiorstw opiera się na rozbudowanym zestawie kryteriów [2, 3]. Są one uwzględniane jako zmienne w modelach matematycznych opracowywanych dla algorytmów. Przeanalizowano dwa podejścia do tego zagadnienia i na ich bazie wygenerowano kolejne, które zostało zaimplementowane w modelu symulacyjnym.

2. Metoda wspomagająca dobór kooperantów oparta na złożonej funkcji kosztu

Autorzy [4] proponują metodę selekcji kooperantów do wspólnej realizacji zamówienia/projektu opartą na jednym rozbudowanym kryterium kosztu. Mieszczą się w nim nie tylko wydatki bezpośrednio poniesione podczas wytwarzania, ale również te związane z transportem oraz zbyt wczesną lub zbyt późną realizacją zamówienia w stosunku do wyznaczonego terminu (ang. lead-time). Sprowadzenie wszystkich czynników uwzględnianych podczas poszukiwania rozwiązania do tej samej jednostki upraszcza problem. Taka postać równania nie wymaga analizy wielokryterialnej. Autorzy tej metody nie precyzują źródeł danych oraz sposobu ich pozyskiwania.

Funkcja celu zdefiniowana w tym modelu składa się z następujących parametrów i zmiennych:

m - liczba potencjalnych wykonawców zamówienia;

n - liczba zadań wyodrębnionych w zleceniu (projekcie);

$M = \{1, \dots, m\}$ - zbiór potencjalnych wykonawców zamówienia (przedsiębiorstwa obecne na platformie wytwórczej, w klastrze), $j \in M$;

$N = \{1, \dots, n\}$ - zbiór zadań związanych z realizacją zamówienia, $i \in N$;

i - indeks oznaczający zadanie;

j - indeks oznaczający potencjalnego kooperanta.

$\{w_i\}$ - zbiór wszystkich możliwych planów produkcji z wyszczególnieniem jednostek wytwórczych, gdzie $i = 1, 2, 3, \dots, I$;

(i, j) - zestaw kombinacji dla planu procesu wytwarzania, gdzie proces i jest realizowany w jednostce j ;

c_{ij} - koszt procesu i realizowanego przez kooperanta j ;

t_{ij} - czas realizacji zadania x_i podany przez kandydata f_{ij} ;

D_c - wyznaczony czas na wytworzenie produktu (eng. lead-time);

$D(w_i)$ - całkowity czas ukończenia procesu według planu w_i ;

$r_{ij}(r_{lh}) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli proces } i \text{ lub } l \text{ jest realizowany przez partnera } j \text{ lub } h; \\ 0, & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases}$

$\delta_{j,h} = \begin{cases} 0, & \text{jeżeli } j = h \text{ (oznacza to, że proces } i \text{ i } l \text{ są realizowane w tej} \\ & \text{samej fabryce należącej do kooperanta } j, \text{ wówczas transport} \\ & \text{pomiędzy tymi procesami nie jest wymagany);} \\ 1, & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases}$

$\xi_{i,l} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } l = i + 1 \text{ lub } i = l + 1; \\ 0, & \text{w przeciwnym razie (co oznacza, że proces } j \text{ nie poprzedza} \\ & \text{bezpośrednio procesu } l, \text{ zatem transport pomiędzy tymi} \\ & \text{procesami nie jest wymagany).} \end{cases}$

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli proces } i \text{ (lub } l) \text{ jest realizowany przez przedsiębiorstwo } j \text{ lub } h; \\ 0, & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases}$

θ - koszty transportu określonej partii produktu w przeliczeniu na jednostkę odległości;

s_{jh} - czas transportu pomiędzy partnerem j i h ;

z_{jh} - dystans na, którym wymagany jest transport pomiędzy partnerem j i h ;

Czas związany z wcześniejszym od pożądanego ukończeniem zamówienia oraz

spóźnieniem można wyrazić następująco:

$$F(w_i) = \max\{0, D_c - D(w_i)\} \quad (2.1)$$

$$L(w_i) = \max\{0, D(w_i) - D_c\} \quad (2.2)$$

α - kary związane ze zbyt wczesnym ukończeniem realizacji zamówienia w przeliczeniu na jednostkę czasu ($\alpha > 0$);

β - kary związane ze spóźnieniem przy realizacji zamówienia w przeliczeniu na jednostkę czasu ($\beta > 0$);

$C(w_i)$ – sumaryczna wartość, koszty całkowite w tym koszty bezpośrednio związane z wytwarzaniem, koszty transportu oraz koszty związane z czynnikiem czasu.

Funkcja celu ma następującą postać:

$$C(w_i) = \sum_{(i,j) \in w_i} x_{ij} c_{ij} + \sum_{(i,j) \in w_i} \sum_{(l,h) \in w_i} r_{ij} r_{lh} \delta_{jh} \xi_{il} * \theta * s_{jh} + \alpha F(w_i) + \beta L(w_i) \quad (2.3)$$

Z równania (2.3) wynika, że poszczególne plany produkcji mogą być oceniane za pomocą złożonej funkcji kosztów. Zatem wybór optymalnego wariantu konfiguracji sieci wytwórczej polega na wyborze optymalnego w , dla którego niezerowa funkcja kosztów C jest taka, że:

$$C = \min\{C(w_i)\}, \quad (i, j) \in w_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (2.4)$$

Zagadnienie, które jest analizowane za pomocą przedstawionego modelu ma dużą liczbę rozwiązań. Teoretycznie liczba rozwiązań możliwych do implementacji wynosi m^n . Jednak w rzeczywistości każdy zakład wytwórczy ma swoje kluczowe kompetencje w ograniczonym zakresie zadań. Jest to przede wszystkim zdeterminowane rodzajem posiadanych zasobów. Dlatego liczba wariantów dla planu produkcji $\{w_i\}$, która jest warta rozważania również podlega zawężeniu. Dodatkowo analiza parametrów takich jak c_{ij} oraz t_{ij} także pozwala wyeliminować część kooperantów.

W celu uproszczenia zagadnienia optymalnego doboru kooperantów do realizacji zamówienia autorzy, [4] proponują pragmatyczne podejście przy zastosowaniu opracowanego modelu. Dzięki niemu znacząco zawęża się zbiór danych, które muszą zostać poddane szczegółowej analizie. Procedura ta składa się z następujących etapów:

Krok 1: analiza procesów oferowanych przez potencjalnych kooperantów. Jeżeli dany proces i jest odpowiedni dla realizacji zamówienia (projektu) wówczas weryfikuje się dane na temat kooperanta, który nim dysponuje i sprawdza dokładniej możliwości zakładu wytwórczego j w tym zakresie. Gdy weryfikacja zakończy się pozytywnie dany kooperant zostaje włączony do sieci możliwych rozwiązań.

Krok 2: zapis alternatywnych konfiguracji przedsiębiorstwa wirtualnego w postaci ciągów kombinacji (i, j) . Możliwe do realizacji plany procesu można przedstawić jak w 2.5.

$$(w_i) = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1,1)(2,1)(3,2)(4,1) \\ (1,1)(2,2)(3,2)(4,1) \\ (1,1)(2,2)(3,1)(4,1) \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Z (2.5.) wynika, że istnieją trzy alternatywne konfiguracje kooperantów dla analizowanego zamówienia. Pierwszy z planów przewiduje, że zadanie 1 będzie realizowane u kooperanta 1, zadanie 2 u kooperanta 1, zadanie 3 u kooperanta 2 i zadanie 4 u kooperanta 1. Analogicznie zapis ten odczytujemy dla pozostałych planów produkcji.

Krok 3: obliczenie parametrów s_{jh} , z_{jh} , t_{ij} , c_{ij} dla każdego z alternatywnych planów produkcji.

Krok 3.1: obliczenie wartości t_{ij} według równania $t_{ij} = \eta^s + \eta^r + \eta^q + \eta^p$, gdzie η^s - czas przebrojenia, η^r - czas procesu (przetwarzania), η^q - czas oczekiwania (kolejki przy stanowiskach), η^p - czas przygotowania do realizacji procesu. Czas t_{ij} jest specyficzny dla danego produktu i zależy od wyznaczonej wielkości partii. Szacuje się go na podstawie danych historycznych dotyczących przeciętnego procesu realizowanego w danej jednostce wytwórczej. t_{ij} oraz s_{jh} są składowymi wartościami $D(w_i)$ niezbędnej do obliczenia kosztów spóźnienia $L(w_i)$ lub zbyt wczesnego ukończenia prac $L(w_i)$.

Krok 3.2: obliczenie wartości c_{ij} według wzoru opartego na kosztach ogólnych następującej postaci: $c_{ij} = (1 + w^h) \times (w^p * \eta^p + w^o * \eta^o)$, gdzie: w^h - koszty ogólne związane z wytwarzaniem produktu w jednostce j , w^p - nakłady pracy związane z przygotowaniem procesu produkcji wyrobu w jednostce j , w^o - nakłady pracy związane z realizacją procesu produkcji wyrobu w jednostce j .

Krok 4: obliczenie całkowitych kosztów dla poszczególnych konfiguracji alternatywnych według równania 2.3.

Krok 5: wybór optymalnej konfiguracji przedsiębiorstwa wirtualnego zgodnie z funkcją celu zapisaną w 2.4.

Po zakończeniu analizy według podanego algorytmu jednostka wiodąca może zlecić realizację poszczególnych planów cząstkowych wybranym kooperantom.

Model selekcji przedsiębiorstw oparty na kryterium kosztu jest prosty do zastosowania w praktyce. Opiera się na podstawowych danych możliwych do pozyskania z systemów PLM/ PDM czy też MRP. Jego wadą jest nie uwzględnienie czynnika ryzyka związanego z terminowością. Wartości związane ze zdolnością produkcyjną nie są analizowane w ujęciu ilościowym, a jedynie jakościowym w kroku 1. Model nie zawiera także informacji na temat doświadczenia potencjalnych wykonawców zamówienia we współpracy.

3. Metoda wspomagająca dobór kooperantów z rozbudowanym zestawem kryteriów funkcji celu

Model przedstawiony w [5] jest bardziej złożony od zaprezentowanego w poprzedniej sekcji, ponieważ zawiera szeroki zestaw kryteriów. Zakłada się w nim, że potencjalni kooperanci funkcjonują w jednorodnym środowisku opartym na wspólnej infrastrukturze informacyjno – komunikacyjnej takim jak na przykład klaster. Dzięki temu można pozyskać wszystkie dane niezbędne do procesu selekcji z odpowiednich baz. Zaproponowano w nim trzy główne kryteria doboru kooperantów do organizacji wirtualnej (OW):

- koszt realizacji zamówienia,
- ryzyko związane z niedoborem zdolności produkcyjnej,
- doświadczenie we współpracy z kooperantami sieci.

W [5] wymieniono kilka metod, które można wykorzystać do analizy zbudowanego modelu. Jedną z nich jest **programowanie celowe**, wybiera się wówczas zmienną, która jest optymalizowana w sposób klasyczny. Natomiast pozostałe muszą jedynie przekroczyć pewien wyznaczony, satysfakcjonujący poziom. Jeżeli nie można osiągnąć wartości celowych dla wszystkich zmiennych decydent może wybrać rozwiązanie, które charakteryzuje się najmniejszym odchyleniem od wartości celowych.

Drugim proponowanym podejściem jest agregacja celów w postaci **funkcji celu**. Będzie ona odzwierciedlała preferencje w stosunku do poszczególnych kryteriów doboru. Mogą być one wyrażone w postaci wag przyznawanych poszczególnym kryteriom.

Autorzy [5] sugerują, że programowanie celowe jest korzystniejszym rozwiązaniem w przypadku gdy zarządzanie siecią wytwórczą jest skoncentrowane na wyniku działalności. Funkcja celu sprawdza się tam gdzie preferowane jest grupowe podejmowanie decyzji. Model składa się z następujących parametrów:

m - liczba potencjalnych wykonawców zamówienia;

n - liczba zadań wyodrębnionych w zleceniu (projekcie);

$M = \{1, \dots, m\}$ - zbiór potencjalnych wykonawców zamówienia (przedsiębiorstwa obecne na platformie wytwórczej, w klastrze), $j \in M$;

$N = \{1, \dots, n\}$ - zbiór zadań związanych z realizacją zamówienia, $i \in N$;

i - indeks oznaczający zadanie;

j - indeks oznaczający potencjalnego kooperanta.

k - indeks oznaczający rozkład zdolności produkcyjnej kandydata

$A_{i,j}$ = rozkład zdolności produkcyjnej (ilość pracy), którą kandydat j może wykonać przy realizacji zadania i (np. osobomiesiące), założono, że zdolność produkcyjna jest wyrażona przez dyskretny rozkład prawdopodobieństwa. Zgodnie z tym założeniem:

p_{ij} = prawdopodobieństwa związane z rozkładem zdolności produkcyjnej A_{ij} ;

a_{ij}^k = k -ty element rozkładu A_{ij} ;

$p_{i,j}(k)$ = prawdopodobieństwo związane z k -tym elementem rozkładu.

Ponadto zakłada się, że elementy a_{ij}^k rozkładu są uporządkowane malejąco tzn. $a_{ij}^1 = \max_k a_{ij}^k$;

$\sum_k p_{ij}(k) = 1$, zatem wartość oczekiwana zdolności produkcyjnej kandydata j poświęconej realizacji zadania i ma następującą postać:

$$E[A_{i,j}] = \sum_k p_{ij}(k) a_{ij}^k \quad \forall i \in N, j \in M.$$

c_{ij} - koszt zmienny kandydata i realizującego zadanie j (np. zł/szt.);

b_j - koszt stały związany z wprowadzeniem kooperanta j do organizacji wirtualnej (OW);

b_{ij} - koszt stały związany z rozpoczęciem pracy kandydata i nad zadaniem j .

Zmienne występujące w modelu:

x_{ij} - praca w ramach zadania i przydzielona kandydatowi j

y_j - przyjmuje wartość jeden gdy dany kandydat jest wybrany do uczestnictwa w OW; zero w przeciwnym razie.

$$y_j = \begin{cases} 0, & \text{jeżeli } x_{ij} = 0 \quad i \in N \\ 1, & \text{jeżeli } x_{ij} > 0 \text{ dla co najmniej jednego } i \in N \end{cases}$$

y_{ij} - przyjmuje wartość jeden gdy kandydat j wykonuje pracę w ramach zadania i ; zero w

przeciwnym razie.

$$y_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{jeżeli } x_{ij} = 0 \\ 1, & \text{jeżeli } x_{ij} > 0 \end{cases}$$

w_i - obciążenia pracą mierzone w wybranej jednostce (np. osobomiesiące), gdzie zadanie $i \in N$;

$\theta_{j,h}$ - koszty transportu określonej partii produktu w przeliczeniu na jednostkę odległości od kooperanta j do kooperanta h .

$\delta_{i,l}$ - wymagany rozmiar transportu związany z realizacją zadań i i l ;

$$r_{ij}(r_{lh}) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli dana para kooperantów } j \text{ i } h \text{ jest wybrana do uczestnictwa w OW} \\ 0, & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases};$$

$\xi_{i,l} =$

$$\begin{cases} 1, & \text{jeżeli } l = i + 1 \text{ lub } i = l + 1; \\ 0, & \text{w przeciwnym razie (co oznacza, że proces } j \text{ nie poprzedza bezpośrednio} \\ & \text{procesu } l, \text{ zatem transport pomiędzy tymi procesami nie jest wymagany)} \end{cases};$$

ρ_{ij}^{EDR} - ryzyko związane ze zdolnością produkcyjną kooperanta j przydzielonego do realizacji zadania i , mierzone jako EDR (ang. *expected downside risk*);

$e_{j,h}$ - liczba doświadczeń związanych ze współpracą jednostek j i h ;

e_{max} - maksymalna liczba przypadków wcześniejszej współpracy jaką posiada dany potencjalny uczestnik OW;

Funkcja celu uwzględniająca jedynie kryterium kosztów związanych z wytwarzaniem ma następującą postać:

$$\min_{X,Y} \text{cost}(X,Y) = \sum_{i=1}^n b_j y_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (c_{ij} x_{ij} + b_{ij} y_{ij}) \quad (3.1)$$

Dodatkowo sformułowano ograniczenia, które pozwoliły na otrzymywanie jedynie rozwiązań wykonalnych.

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq w_i \quad \forall i \in N. \quad (3.2)$$

Warunek 9.19 zapewnia, że obciążenie pracą związane z poszczególnymi zadaniami musi być w całości zrealizowane.

$$x_{i,j} \leq E[A_{ij}] \quad (3.3)$$

$$y_{i,j} \geq \frac{x_{i,j}}{a_{ij}^1}, \quad \forall i \in N, j \in M \text{ dla } a_{ij}^1 > 0 \quad (3.4)$$

Spełnienie nierówności 3.3 oraz 3.4 pozwala przypisać danemu kooperantowi jedynie takie obciążenie pracą, które nie przekracza jego maksymalnej zdolności produkcyjnej (mocy) w zakresie tego zadania.

$$y_j \geq \frac{\sum_{i \in N} x_{ij}}{\sum_{i \in N} w_i} - e \quad (3.5)$$

$$y_j \leq \frac{\sum_{i \in N} x_{ij}}{\sum_{i \in N} w_i} - e + 1 \quad (3.6)$$

Nierówność 3.5 pozwala wyeliminować rozwiązania, w których kooperantowi przydzielony jest zbyt mały udział pracy żeby mógł zostać uczestnikiem OW. Jeżeli prawa strona jest mniejsza od zera wówczas model jest niewykonalny, ponieważ y_j jest wartością zero-jedynkową. Druga z podanych wyżej nierówności 3.6 pozwala wyeliminować rozwiązania, w których y_j przybiera wartości większe od jedynki. W rezultacie $y_j = 1$ jeżeli co najmniej $e \times 100$ procent obciążenia pracą w projekcie jest przypisane kandydatowi j , w przeciwnym razie $y_j = 0$.

Pozostałe czynniki istotne z punktu widzenia selekcji kooperantów do OW, poza kosztami związanymi z jej powołaniem i funkcjonowaniem, zostały ujęte w oddzielnych równaniach. Funkcja uwzględniająca całkowite koszty transportu związane z wybranym wariantem konfiguracji OW ma następującą postać:

$$Cost^{TRANS} = \sum_{i,l \in N} \delta_{il} \theta_{jh} \xi_{il} \quad (3.7)$$

Autorzy pracy uwzględniają w modelu jedynie takie wahania związane ze zdolnością produkcyjną, których pojawienie się wymagałoby rekonfiguracji OW, czyli przesunięcia obciążenia mocy produkcyjnych do innego kooperanta. Dokonywanie modyfikacji w tym zakresie powoduje oczywiście wzrost kosztów związanych z tworzeniem OW. Ryzyko w tym zakresie wynika z prawdopodobieństwa pojawienia się niedoboru zdolności produkcyjnej (ang. *expected downside risk EDR*) w stosunku do wartości docelowej czyli przydzielonego obciążenia pracą. Funkcja obejmująca czynniki ryzyka związane z niewystarczającą ilością zdolności produkcyjnej ma następującą postać:

$$\rho_{ij}^{EDR} = \sum_k p_{ij}(k) a_{ij}^{k-} \quad (3.8)$$

gdzie:

$a_{ij}^{k+} \geq 0$ oraz $a_{ij}^{k-} \geq 0$ wskazują odpowiednio pozytywną i negatywną różnicę $a_{ij}^k - x_{ij}$ dla dowolnego $a_{ij}^k \in A_{ij}$. Właściwe wartości tych zmiennych zapewniają następujące ograniczenie:

$$x_{ij} - a_{ij}^{k-} + a_{ij}^{k+} = a_{ij}^k \quad \forall i \in N, j \in M, a_{ij}^k \in A_{ij} \quad (3.9)$$

W równaniu 3.8 uwzględniono jedynie sumę prawdopodobieństwa takich zdarzeń gdzie zdolność produkcyjna jaką dysponuje kooperant jest niższa niż przydzielona do realizacji, ponieważ a_{ij}^{k-} wynosi zero gdy kooperant posiada dostateczną ilość zdolności produkcyjnej. Całkowita wartość *EDR* związana z konfiguracją OW może być wyrażona jako suma:

$$\sum_i \sum_j \rho_{ij}^{EDR} \quad (3.10)$$

Autorzy [5] sugerują, że problem zarządzania ryzykiem można rozwiązać w proponowanym modelu poprzez programowanie celowe wprowadzając przykładowo następujące ograniczenie $\rho_{ij}^{EDR} \leq EDR_{max}$ lub poprzez funkcję wartości odnoszącą się do ryzyka oraz kosztów. Oba wymienione podejścia wymagają estymacji parametrów albo w postaci akceptowalnego poziomu ryzyka (EDR_{max}), albo poprzez rozwinięcie relacji pomiędzy kosztem, a ryzykiem. Jeżeli projekt zawiera zadania, których ukończenie jest

kluczowe dla realizacji kilku innych zadań wówczas takie zadania mogą mieć przyznane większe wagi. Należałoby również założyć niższy akceptowalny poziom ryzyka dla tych zadań lub wyższe koszty ryzyka zadań kluczowych. Doświadczenie we współpracy z pozostałymi uczestnikami danej sieci (klastra) zostało uwzględnione w modelu poprzez sformułowanie następującego równania:

$$\gamma^{LIN}(Y, Z) = \sum_{j \in M} e_{max} y_j - \sum_{\substack{j, h \in M \\ j < h}} e_{j, h} r_{ij}(r_{lh}) \quad (3.11)$$

Zakłada się, że im więcej jednostki współpracowały ze sobą wcześniej tym lepiej się znają, a to obniża koszty związane z ich współdziałaniem. Zależności pomiędzy organizacjami mogą zostać włączone w model przy założeniu, że historia współpracy przedsiębiorstw znajdujących się w środowisku dedykowanym tworzeniu OW jest rejestrowana.

Jest to złożona metoda pozwalająca zastosować szeroki wachlarz kryteriów selekcji istotnych z punktu widzenia zlecającego pracę. Jednocześnie charakteryzuje się znaczną elastycznością, ponieważ każde z kryteriów stanowi osobny moduł w modelu. Dzięki temu wykluczając jedno z kryteriów, nieistotne w określonym przypadku, nadal można wykorzystać proponowaną metodę. Nie określono jednoznacznie podejścia do analizy wielokryterialnej. Można zatem dokonać wyboru w zależności od priorytetów użytkownika.

4. Metoda selekcji kooperantów z wagami dla kryteriów selekcji

Po dokonaniu analizy rozwiązań przedstawionych w poprzednich rozdziałach opracowano nowy model. Zawiera on rozbudowany zestaw kryteriów, które przekształcono na zmienne decyzyjne poszczególnych funkcji. Wykorzystano następujący zestaw parametrów i zmiennych:

m - liczba potencjalnych wykonawców zamówienia (uczestników PW/OW);

n - liczba zadań wyodrębnionych w zamówieniu (projekcie);

z - liczba alternatywnych wariantów konfiguracji PW/OW (ścieżek w grafie);

$M = \{1, \dots, m\}$ - zbiór potencjalnych wykonawców zamówienia (przedsiębiorstwa obecne na platformie wytwórczej, w klastrze), $j \in M$;

$N = \{1, \dots, n\}$ - zbiór zadań związanych z realizacją zamówienia, $i \in N$;

$A = \{1, \dots, a\}$ - zbiór alternatywnych wariantów konfiguracji PW/OW;

i - indeks oznaczający zadanie;

j - indeks oznaczający przedsiębiorstwo kandydujące do realizacji zadania i ,

b_j - koszt stały (ogólny/pośredni) związany z wprowadzeniem przedsiębiorstwa j do OW/PW;

b_{ij} - koszt stały (ogólny/pośredni) związany z rozpoczęciem pracy przedsiębiorstwa j nad zadaniem i ;

$$y_j = \begin{cases} 0, & \text{jeżeli } x_{ij} = 0 \ i \in N \\ 1, & \text{jeżeli } x_{ij} > 0 \text{ dla co najmniej jednego } i \in N \end{cases}$$

c_{ij} - koszt zmienny (bezpośredni) przedsiębiorstwa j realizującego zadanie i (np. zł/szt.);

x_{ij} - liczba roboczogodzin w ramach zadania i przydzielona uczestnikowi j ;

$\delta_{i,l}$ - wymagany rozmiar transportu związany z realizacją zadań i i l ;

$\theta_{j,h}$ - koszty transportu określonej partii produktu w przeliczeniu na jednostkę odległości od przedsiębiorstwa j do przedsiębiorstwa h ;

a_{ij} - zdolność produkcyjna (moc) zadeklarowana przez potencjalnego uczestnika OW na platformie wymiany zdolności wytwórczych, wyrażona w roboczogodzinach;

w_i - liczba roboczogodzin niezbędna do realizacji zadania $i \in N$;

$\xi_{i,l}$

$$= \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ jeżeli } l = i + 1 \text{ lub } i = l + 1; \\ 0, \text{ w przeciwnym razie (co oznacza, że proces } j \text{ nie poprzedza bezpośrednio} \\ \text{procesu } l, \text{ zatem transport pomiędzy tymi procesami nie jest wymagany).} \end{array} \right\}$$

p_{ij} - ryzyko związane ze zdolnością wytwórczą zasobów przedsiębiorcy j przydzielonego do realizacji zadania i ;

t_{ij} - czas realizacji zadania i przez przedsiębiorcę j ;

S_{ijlh} - czas potrzebny na przetransportowanie materiałów po zakończeniu realizacji zadania x_i od przedsiębiorcy f_{ij} do przedsiębiorcy f_{lh} , gdzie $i \neq l$ i istnieje łuk (x_i, x_l) pomiędzy węzłem i i l ;

D_c - wymagany termin zakończenia realizacji zamówienia (projektu);

$F_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{ik}\}$ - zbiór przedsiębiorców, którzy posiadają zasoby niezbędne do realizacji zadania x_i ;

e_i - liczba przedsiębiorstw biorących udział w realizacji zadania i ;

E_{ij} - najwcześniejszy termin rozpoczęcia realizacji zadania x_i , proponowany przez przedsiębiorstwo f_{ij} ;

γ - waga zadania i zależna od jego pracochłonności oraz rodzaju kompetencji wymaganych do realizacji;

q_j - poziom jakości określony dla danego przedsiębiorstwa j .

Funkcja kosztu w modelu ma następującą postać:

$$\min_{X,Y} \text{cost}(X,Y) = \sum_{i=1}^n b_j y_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (c_{ij} x_{ij} + b_{ij} y_{ij}) + \sum_{i,l \in N} \sum_{j,h \in M} \delta_{i,l} \theta_{j,h} \xi_{i,l} \quad (4.1)$$

Funkcja kosztu składa się z trzech elementów. Pierwszy z nich stanowią wydatki jakie ponosi jednostka wytwórcza przystępując do przedsiębiorstwa wirtualnego/organizacji wirtualnej. Koszty koordynacji i zarządzania działaniami realizowanymi we współpracy z innymi producentami są wyższe niż w przypadku indywidualnej realizacji zamówienia przez pojedynczą organizację. Ich wzrost jest na ogół proporcjonalny do wzrostu liczby kooperantów. Zagadnienie to opisano szerzej w rozdziale 8 dotyczącym funkcjonowania klastrów. Dlatego uznano je za istotne i uwzględniono tę wartość w równaniu. Drugim elementem funkcji są koszty stałe i zmienne związane z wytwarzaniem. Ostatni składnik wyraża sumę wydatków poniesionych na transport elementów poddawanych obróbce pomiędzy poszczególnymi przedsiębiorstwami. Jest on ściśle związany z wolumenem towaru oraz odległością.

Podstawowym kryterium, które musi być spełnione na określonym poziomie jest **termin realizacji całego przedsięwzięcia**. Jeżeli dana konfiguracja nie zapewnia ukończenia prac w wyznaczonym terminie D_c wówczas nie jest uwzględniana w zbiorze możliwych rozwiązań. Zatem musi być spełniona nierówność 11.2:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{ij} + \sum_{i,l \in N} \sum_{j,h \in M} s_{ijlh} \leq D_c \quad (4.2)$$

Dodatkowo sformułowano równania, które zapewniają zachowanie relacji pierwszeństwa podczas realizacji zadań. Do wizualizacji zdekomponowanego zamówienia wykorzystano grafy. Indeks oznaczający numer zadania jest tożsamy z indeksem oznaczającym numer węzła w grafie i mieści się w zbiorze $N = \{1, \dots, n\}$.

$$D_{lh} \geq D_{ij} + t_{ij} + S_{ijlh} \quad (4.3)$$

gdzie: l , w grafie stanowiącym graficzną reprezentację zdekomponowanego zamówienia, jest bezpośrednim węzłem następnym po węźle i i zadanie x_{lh} następuje po zadaniu x_{ij} , natomiast $f_{ij} = 1$ i $f_{lh} = 1$.

$$D_{ij} \geq E_{ij} \quad (4.4)$$

dla każdego i i j gdzie $f_{ij} = 1$,

Kolejnym kryterium selekcji kooperantów do OW zastosowanym w modelu jest posiadana zdolność (moc) wytwórcza rozpatrywana zarówno w aspekcie jakościowym tj. typ zadań jakie może zrealizować dana jednostka produkcyjna w wyznaczonym okresie czasu jak i ilościowym odnoszącym się do liczby roboczogodzin jaka może być przydzielona poszczególnym uczestnikom OW. Dane niezbędne do zastosowania tego kryterium nie są dostępne w klasycznych systemach klasy ERP PDM czy PLM.

Do zbioru możliwych rozwiązań włączani są kooperanci, którzy zadeklarowali w rozpatrywanym miesiącu wartość $a_{ij} > 0$ dla danego zadania i stanowiącego niezbędny element realizacji rozpatrywanego zamówienia.

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq w_i \quad \forall i \in N \quad (4.5)$$

Równanie 4.5 zapewnia, że całe obciążenie pracą związane ze wszystkimi zadaniami zostanie przypisane wykonawcom zamówienia. Do modelu wprowadzono również zmienną e_i oznaczającą **liczbę kooperantów biorących udział w realizacji zadania i** . Zmienna e_i często przyjmuje wartość 1, ponieważ w modelu założono, że **jeżeli** istnieje co najmniej jedno przedsiębiorstwo, które zadeklarowało zdolność produkcyjną większą lub równą liczbie roboczogodzin wymaganych do realizacji zadania i to nie dokonuje się podziału tego zadania. W przeciwnym razie zadanie jest dzielone zgodnie z założonymi w modelu regułami. Wówczas zmienna e_i przyjmuje wartość większą od 1.

Drugim kryterium selekcji wprowadzonym do modelu jest poziom **współczynnika ryzyka** związanego z daną konfiguracją OW/PW. Kryterium wyrażono w postaci następującej funkcji:

$$\min risk = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \quad (4.6)$$

Następnym kryterium selekcji kooperantów wprowadzonym do modelu jest poziom jakości osiągany przez dane przedsiębiorstwo. Zakłada się, że istnieje wartość określająca standard jaki osiągnęła dana jednostka wytwórcza w obszarze jakości wyrobów. Im wyższa wartość zmiennej q_j dla danej konfiguracji tym lepiej. Zatem funkcja ma postać:

$$\max \text{quality} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_j}{\sum_{i=1}^n e_i} \quad (4.7)$$

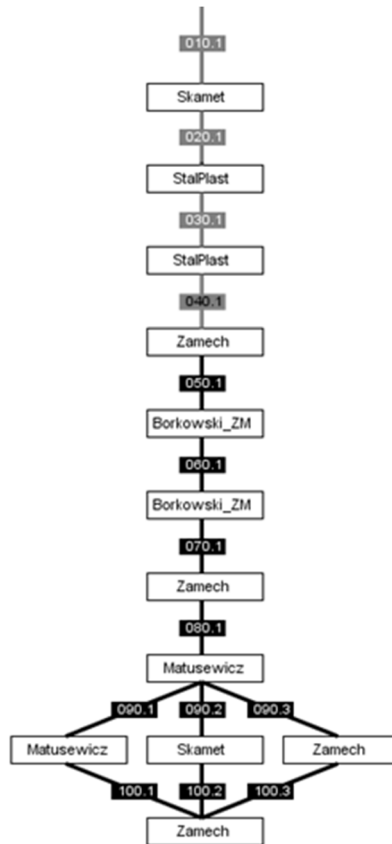
5. Implementacja opracowanego algorytmu w modelu symulacyjnym

W modelu symulacyjnym zastosowano trzy metody wizualizacji danych na temat realizowanych zamówień ich statusu oraz konfiguracji organizacji wirtualnej wytypowanej jako najkorzystniejsza z punktu widzenia wymagań użytkownika. Metody te uzupełniają się tak aby dostarczyć użytkownikowi kompleksowy zestaw czytelnych danych. Pierwszy element wizualizacji stanowi aktywne okno z informacjami na temat procesu widoczne z prawej strony na rysunku 1. Drugim elementem jest sieć zaprezentowana na tle fragmentu mapy Dolnego Śląska z <http://maps.google.pl> w celu precyzyjnego określenia położenia poszczególnych przedsiębiorstw względem siebie. Przedsiębiorstwa rozmieszczono na mapie na podstawie współrzędnych z tego źródła. Na podstawie informacji z <http://maps.google.pl> określono również odległości pomiędzy poszczególnymi jednostkami. Wpływa ona bowiem bezpośrednio na koszt realizowanego przez jednostki wytwórcze zamówienia (koszt transportu). W modelu uwzględniono odległość podawaną dla najkrótszego czasu transportu. Założono koszt za 1km = 2zł. Operacje oznaczono okręgiem natomiast ścieżki transportowe linią (rys.1).



Rys. 1. Sieć wizualizująca konfigurację dla danego zamówienia

Trzecim elementem wizualizacji organizacji wirtualnej w modelu jest tzw. drzewo. Prezentuje ono nazwy wszystkich przedsiębiorców uczestniczących w realizacji danego zamówienia. W drzewie występują rozgałęzienia jeżeli jakaś operacja jest podzielona na więcej niż 1 suboperację. Na rysunku 2 taka sytuacja ma miejsce w przypadku operacji nr 90. Zaplanowano jej realizację w trzech różnych przedsiębiorstwach (Matuszewicz, Skamet i Zamech).



Rys. 2. Drzewo wizualizujące konfigurację organizacji wirtualnej dla danego zamówienia

Wszystkie wymienione w tej sekcji metody wizualizacji są kompatybilne względem siebie i pozwalają użytkownikowi lepiej zrozumieć procesy jakie zachodzą podczas symulacji. Symulacja jest efektem wcześniejszej analizy zamówienia zgodnie z wprowadzonymi do modelu kryteriami przy użyciu zaimplementowanego algorytmu. Procedura wyszukiwania najlepszej konfiguracji organizacji/przedsiębiorstwa wirtualnego jest również dostępna w modelu symulacyjnym tak, że można prześledzić cały proces decyzyjny związany z rozpatrywaniem zamówieniem.

6. Wnioski

Na przykładzie zaprezentowanym w artykule widać, że model symulacyjny jest dobrym narzędziem do weryfikacji działania algorytmów. Daje możliwość czytelnej wizualizacji złożonych zagadnień. Ponadto bazy danych zbudowane dla potrzeb modelu symulacyjnego mogą stanowić podstawę do budowy oprogramowania wspomagającego procesy decyzyjne. Elementy grafiki natomiast są źródłem w przypadku prac nad interfejsem użytkownika. Program symulacyjny również w tym przypadku pozwala sprawdzić użyteczność wygenerowanych rozwiązań.

Literatura

1. Chlebus E., Chrobot J., Gąbka J., Susz S.: Clusters as a Modern Pattern of Running Business Supporting Innovation, Management and Production Engineering Review, Vol. 2, Nr 2, 2011, 71–79,
2. Gąbka J., Chlebus E.: Algorithm supporting partner selection in dispersed manufacturing environment, w: Production Engineering. Innovations&Technologies of the Future, Instytut Technologii Maszyn I Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011, 48-54.
3. Gąbka J., Susz S., Chlebus E.: A Concept of Advisory System Supporting Partner Selection in Virtual Organizations, w: Innovations in Management and Production Engineering, Oficyna Wydawnicza PTZP, Opole 2012.
4. Feng D. Z., Yamashiro M.: A pragmatic approach for optimal selection of plant-specific process plans in a virtual enterprise, Journal of Materials Processing Technology, vol. 173, 2006, 194-200.
5. Jarimo T., Salo A.: Optimal Partner Selection in Virtual Organisations with Capacity Risk and Network Interdependencies, 2007. Materiały z projektu ECOLED, 2007.

Dr inż. Joanna Gąbka

Katedra Technologii Laserowych, Automatyzacji i Organizacji Produkcji.

Politechnika Wroclawska

50-370 Wrocław, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27

tel./fax: (0-71) 320-41-84

e-mail: joanna.gabka@pwr.wroc.pl