Budownictwo i Architektura 2 (2008) 19-36

Metoda projektowania struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego z zastosowaniem algorytmu ewolucyjnego

Piotr Jaśkowski

Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej, Instytut Budownictwa, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: p.jaskowski@pollub.pl

Streszczenie: W artykule podjęto problem projektowania struktury systemu wykonawczego przy harmonogramowaniu realizacji przedsięwzięcia budowlanego typu „kompleks operacji". System ten złożony jest z niejednorodnych jednostek operacyjnych generalnego wykonawcy oraz kooperujących jednostek zewnętrznych – podwykonawców. Tworzą oni tymczasową organizację. Jej struktura zmienia się w czasie zgodnie z harmonogramem realizacji przedsięwzięcia. Autor dokonał identyfikacji modelu i formalizacji matematycznej problemu projektowania struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego. Proces doboru wykonawców (elementów systemu) opisano jako problem optymalizacji trójkryterialnej harmonogramu. Ocena możliwych wariantów budowy struktury systemu wykonawczego dokonywana jest przy zastosowaniu kryteriów decydujących o efektywności przedsięwzięcia i działalności generalnego wykonawcy (minimalizacja czasu i kosztu realizacji oraz kosztu robót zleconych podwykonawcom). Do rozwiązania analizowanego problemu opracowano metodę wykorzystującą podejście metaheurystyczne. W tym celu zaadaptowano algorytm ewolucyjny (wykorzystujący procesy stochastyczne) do rozwiązywania zagadnień trójkryterialnej optymalizacji harmonogramów w warunkach deterministycznych oraz opracowano heurystyczny algorytm rozdziału ograniczonej i zmiennej w czasie liczby jednostek zasobów i wykonawców. Rozwiązania generowane są z wykorzystaniem funkcji skalaryzującej osiągnięcia celów optymalizacji, bazującej na metryce Czebyszewa. Wybór rozwiązania końcowego może być dokonany poprzez analizę przybliżenia całego zbioru rozwiązań niezdominowanych (na podstawie preferencji globalnych decydenta) lub z wykorzystaniem ineraktywnej metody Steuera.

Słowa kluczowe: projektowanie realizacji przedsięwzięć budowlanych, optymalizacja wielokryterialna harmonogramów, wybór wykonawców.

1. Wprowadzenie

Ostatnie lata doprowadziły do zmiany wielkości przedsiębiorstw budowlanych pod względem zatrudnienia. Ze względu na duże koszty zatrudnienia siły roboczej oraz trudności w uzyskaniu zleceń, wiele przedsiębiorstw budowlanych zmniejsza liczbę pracowników. Duże przedsiębiorstwa w większości uległy podziałowi lub likwidacji.

Przynosi to efekt w postaci zmniejszenia kosztów działalności przedsiębiorstwa oraz kosztów realizacji przedsięwzięć, ale jednocześnie ogranicza zdolności produkcyjne i uniemożliwia realizację większych przedsięwzięć (wygranie przetargu). Wydłużanie czasu realizacji przedsięwzięcia obniża pozycję przetargową przedsiębiorstw wykonawczych. W związku z tym jest niezbędne stosowanie metod wspomagających projektowanie realizacji przedsięwzięć w warunkach ograniczonej dostępności zasobów oraz zazwyczaj jest konieczna współpraca z innymi przedsiębiorstwami przy podejmowaniu zleceń i ich realizacji.

Powstaje wtedy nowa organizacja na czas i do wykonania przedsięwzięcia, której efektywność działania w dużej mierze zależy od prawidłowego doboru jej elementów. Zwykle inicjatywę tworzenia takiej organizacji (i decyzję o przystąpieniu do przetargu) podejmuje generalny wykonawca, który przejmuje funkcję kierowniczą. Taką sytuację spotyka się w wielu stosowanych w praktyce budownictwa systemach realizacji przedsięwzięć inwestycyjno-budowlanych (Kasprowicz [9]).

Artykuł jest wynikiem prac dotyczących zagadnienia projektowania struktury systemu wykonawczego przy harmonogramowaniu realizacji przedsięwzięcia budowlanego typu „kompleks operacji" (Jaśkowski [6]). System ten złożony jest z niejednorodnych, samodzielnych jednostek operacyjnych generalnego wykonawcy – np. przedsiębiorstwa o strukturze sieciowej, oraz kooperujących jednostek zewnętrznych – podwykonawców. Tworzą oni rezerwę realizatorów dla generalnego wykonawcy. W rozważaniach przyjęto zdeterminowany charakter projektowanych procesów technologicznych. Dostępność wszystkich zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa (zasobów ludzkich jak i maszyn oraz urządzeń) jest ograniczona, przy czym poziom ich dostępności może być zmienny w czasie realizacji przedsięwzięcia.

System wykonawczy (roboczy) wyodrębniony jest w ramach systemu realizacji przedsięwzięć inwestycyjno-budowlanych. Jego zadaniem jest wykonawstwo procesu budowlanego – zespołu działań technicznych, z wykorzystaniem dysponowanych zasobów: środków technicznych, siły roboczej, na realizowanych obiektach budowlanych, zgodnie z przyjętymi procedurami technologicznymi, organizacyjnymi i zasadami ekonomicznymi.

Pojęcie struktura systemu oznacza pełny zbiór składników systemu, wyodrębnionych zgodnie z ustalonym kryterium ich wyróżnienia (rodzaj, zakres wykonywanych robót i procesów, kryterium funkcji, miejsca realizacji, własności itd.) oraz ścisłą charakterystykę wzajemnych relacji (związków) między tymi składnikami (prawne, własnościowe, umowne, kanały przepływów logistycznych, tj. informacji, materiałów, pieniędzy, ludzi). Związki te jednak, ze względu na ich dynamikę, rozpatrywać należy w funkcji czasu. Struktura systemu wykonawczego, jakkolwiek z góry ustalona w procesie projektowania realizacji przedsięwzięcia, jest strukturą dynamiczną (zmienną w czasie przebiegu wykonania zadań).

Przedsięwzięcia typu „kompleks operacji" obejmują niejednorodne pod względem technologicznym procesy, które nie charakteryzują się cyklicznością i rytmicznością realizacji (Marcinkowski [11]).

Elastyczność rozwiązań legislacyjnych w Prawie budowlanym pozwala na funkcjonowanie w praktyce wielu modeli i systemów realizacji przedsięwzięć inwestycyjno-budowlanych. Analiza istniejących modeli realizacji przedsięwzięć budowlanych umożliwia klasyfikacje systemów wykonawczych na dwa główne typy:

- system złożony z niezależnych wykonawców,
- system złożony z zasobów generalnego wykonawcy i najczęściej niezależnych podwykonawców, którzy wykonują procesy o zakresie nie objętym specjalizacją generalnego wykonawcy, ale zazwyczaj także stanowią rezerwę zasobów.

Projektowanie struktury systemu wykonawczego złożonego z niezależnych wykonawców (np. w systemie construction management) były przedmiotem prac Kasprowicza [9]. Brak jest natomiast badań dotyczących projektowania struktury systemu drugiego typu. W artykule zaprezentowano metodę projektowania dynamicznej (zmiennej w czasie) struktury systemu wykonawczego, pozwalającą na uwzględnienie istniejących ograniczeń w dostępności zasobów odnawialnych generalnego wykonawcy oraz wymagań technologicznych realizacji przedsięwzięć budowlanych typu „kompleks operacji".

2. Opis metody projektowania struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego

Obecnie stosowane metody projektowania struktury systemu wykonawczego w dużym stopniu oparte są na intuicji decydenta i projektanta. W proponowanej przez autora metodzie PSSWPB (Projektowanie Struktury Systemu Wykonawczego Przedsięwzięcia Budowlanego) podejmowanie decyzji o wyborze wykonawców na etapie harmonogramowania przedsięwzięcia będzie wspomagać system komputerowy, umożliwiający ocenę wariantów podejmowanych decyzji na podstawie kryteriów decydujących o efektywności całego przedsięwzięcia z punktu widzenia inwestora i generalnego wykonawcy.

Główne etapy proponowanej metody to:

1. Przygotowanie danych do podejmowania decyzji, a w szczególności budowa grafu zależności technologicznych między procesami (pakietami robót), wybór wiarygodnych (potencjalnych) podwykonawców zapewniających odpowiednią jakość realizacji procesów oraz ustalenie czasów i kosztów realizacji procesów a także ograniczeń w dostępności zasobów i wykonawców.

2. Wybór rozwiązania – struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego, wspomagany obliczeniami przeprowadzonymi z wykorzystaniem systemu komputerowego.

3. Weryfikacja rozwiązania i ewentualnie zmiany terminów realizacji procesów w ramach istniejących realnych zapasów czasu.

4. Kontrola warunków i terminów realizacji procesów (po skierowaniu uzyskanego rozwiązania do realizacji) i ewentualnie aktualizacja modelu zagadnienia.

2.1. Identyfikacja modelu zagadnienia

Wynikiem procesu projektowania jest dynamiczna struktura systemu wykonawczego, której odpowiada harmonogram realizacji przedsięwzięcia, stanowiący podstawę jej oceny. Harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych typu „kompleks operacji" oparte jest na wykorzystaniu metod sieciowych. Uwarunkowania realizacyjne technologii robót przedsięwzięcia budowlanego można opisać za pomocą sieci w konwencji wierzchołkowej (Biernacki i Cyunel [1]):

$$S = \left\langle G, \left\{T, K\right\}\right\rangle. \tag{1}$$

Zależności kolejnościowe między poszczególnymi procesami wchodzącymi w skład przedsięwzięcia określa unigraf $G = \left\langle W, U, P\right\rangle$, spójny, acykliczny, z jednym wierzchołkiem początkowym i jednym wierzchołkiem końcowym, w którym:

- $W = \left\{w_1, w_2, ..., w_i, ..., w_Y\right\}$ – zbiór wierzchołków grafu, odpowiadających realizowanym procesom budowlanym, Y – liczba procesów i numer wierzchołka oznaczającego koniec przedsięwzięcia,
- $U = \left\{u_1, u_2, ..., u_j, ..., u_N\right\}$ – zbiór łuków grafu, odzwierciedlających zależności kolejnościowe realizacji procesów,
- $P \subset W \times U \times W$ – relacja trójczłonowa, określająca relacje bezpośredniego poprzedzania procesów $w_i : w_i \in W$.

Podział przedsięwzięcia na składowe procesy budowlane lub pakiety robót (według kryterium złożoności) dokonywany jest w taki sposób, aby każdemu procesowi można było jednoznacznie przyporządkować niezbędne zasoby do jego realizacji, niezmienne w czasie jego realizacji.

Funkcje $T : W \to R^+$ oraz $K : W \to R^+$ określone na zbiorze wierzchołków grafu charakteryzują odpowiednio czas wykonania i koszt realizacji każdego procesu $w_i : w_i \in W$ przez wykonawców:

$$h_m \in H^i, \qquad H^i \subset H, \tag{2}$$

gdzie: $H = \left\{h_1, h_2, ..., h_m, ..., h_M\right\}$ – zbiór wszystkich dostępnych, analizowanych, ocenianych wykonawców, M – liczba wszystkich wykonawców, którzy mogą być elementami systemu wykonawczego (roboczego), $H^i = \left\{h_1, h_2, ..., h_I\right\}$ – zbiór niejednorodnych wykonawców $h_m : h_m \in H$ zdolnych do wykonania procesu $w_i : w_i \in W$.

W zbiorze H wszystkich analizowanych i ocenianych wykonawców wyróżnić można dwa podzbiory:

1) HW – zbiór wykonawców należących do zbioru zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa – generalnego wykonawcy,

2) HP – zbiór podwykonawców,

przy czym zachodzą między nimi następujące zależności:

$$HW \cup HP = H \text{ oraz } HW \cap HP = \varnothing \tag{3}$$

Wartości funkcji T i K zestawione są w formie macierzy czasów i kosztów realizacji procesów w sposób następujący:

$$T = \left[t_{im}\right]_{Y \times M} \tag{4}$$

gdzie: t_{im} – czas realizacji procesu $w_i : w_i \in W$ przez wykonawcę $h_m : h_m \in H$ (w przypadku gdy $h_m \notin H^i \Rightarrow t_{im} = \Psi$, Ψ – dostatecznie duża liczba skończona, kara),

$$K = \left[k_{im}\right]_{Y\times M} \tag{5}$$

gdzie: k_{im} – koszt realizacji procesu $w_i : w_i \in W$ przez wykonawcę $h_m : h_m \in H$ (w przypadku gdy $h_m \notin H^i \Rightarrow k_{im} = \Psi$).

Realizacja poszczególnych procesów przedsięwzięcia budowlanego wiąże się z koniecznością zapewnienia zasobów odnawialnych innych niż wykonawcy, np. maszyny, urządzenia budowlane, będących w dyspozycji generalnego wykonawcy.

Każdemu wykonawcy $h_m : h_m \in H^i$ (lub w szczególności $h_m \in HW$) przy realizacji procesu $w_i : w_i \in W$ (a dokładniej, stosowanej przez niego technologii) można przyporządkować zbiór zasobów w liczbie: V_{imz}. Jest to niezbędna liczba jednostek zasobu z_z ze zbioru Z zasobów odnawialnych generalnego wykonawcy, innych niż jednostki operacyjne (wykonawcy), przy realizacji procesu $w_i : w_i \in W$ przez wykonawcę h_m.

W zbiorze wszystkich zasobów odnawialnych generalnego wykonawcy $Z = \left\{z_1, z_2, ..., z_z, ..., z_R\right\}$, innych niż realizatorzy, określona jest liczba dysponowanych jednostek zasobu z_z w czasie. Dostępność zasobów określona jest przez macierz:

$$D = \left[d_{zt}\right]_{R\times G} \tag{6}$$

gdzie: R – liczba rodzajów zasobów; G – liczba przedziałów (okresów) czasu, na jakie podzielono horyzont czasu planowania $\left\langle 0, T_g \right\rangle$, $\mathrm{T_g}$ – górna granica czasu wykonania analizowanego przedsięwzięcia budowlanego; d_{zt} – liczba dostępnych jednostek zasobu z_z w przedziale czasu o numerze t.

Również dostępność wykonawców $h_m : h_m \in H$ nie jest stała w całym horyzoncie planowania realizacji przedsięwzięcia. Gotowość wykonawców do realizacji procesów analizowanego przedsięwzięcia określona jest przez macierz:

$$G = \left[g_{mt}\right]_{M\times G} \tag{7}$$

w której elementy g_{mt} przyjmują wartość 1, gdy wykonawca h_m w przedziale czasu o numerze t może wykonywać proces $w_i : w_i \in W$, wartość 0 w przeciwnym przypadku.

Zbiory H^i i H^j przy $i \neq j$ ze względu na niejednorodność wykonawców nie są rozłączne ($H^i \cap H^j \neq \varnothing$), czyli ten sam wykonawca może realizować różne procesy. W przypadku, gdy wielkość frontu robót jest dużo mniejsza od wielkości frontu pracy wykonawcy (np. wszystkich zespołów roboczych w brygadzie GW czy jednostek organizacyjnych przedsiębiorstwa – podwykonawcy), powierzone wykonawcom zadania nie wyczerpują posiadanych przez nich zdolności produkcyjnych (nie angażują wszystkich zasobów). Z tego względu należy dopuścić możliwość równoczesnej pracy jednostek organizacyjnych (elementarnych) tego samego wykonawcy na różnych frontach roboczych. Dla każdego procesu i wykonawcy można (fakultatywnie) wprowadzić dodatkową charakterystykę P_{im}:

$$0 < P_{im} \leq 1 \tag{8}$$

określającą stopień wykorzystania zdolności produkcyjnej i zaangażowania zasobów wykonawcy $h_m : h_m \in H^i$ przy realizacji procesu $w_i : w_i \in W$.

Ocena możliwych wariantów budowy struktury systemu wykonawczego (roboczego) może dokonywana być przy zastosowaniu następujących kryteriów:

- minimalizacja czasu realizacji przedsięwzięcia,
- minimalizacja łącznego kosztu realizacji wszystkich procesów,
- minimalizacji kosztu procesów zleconych do wykonania zewnętrznym jednostkom operacyjnym (podwykonawcom).

Kryteriom tym, rozpatrywanym niezależnie, mogą odpowiadać rozwiązania znacznie od siebie odległe (w przestrzeni kryteriów). Na przykład czas realizacji przedsięwzięcia odpowiadający minimalnemu kosztowi procesów zleconych podwykonawcom (równemu często zero) może być znacznie większy od minimalnego czasu (a nawet przekraczać termin dyrektywny). Dlatego celowym jest rozpatrywanie wszystkich kryteriów łącznie.

Dwa pierwsze kryteria są oczywiste, komentarza wymaga kryterium trzecie. Przyjęcie za kryterium minimalizacji kosztu procesów zleconych do wykonania podwykonawcom przynosi efekt w postaci:

- wyboru najtańszych podwykonawców spośród wszystkich analizowanych a zapewniających zbliżoną (dopuszczalną) jakość wykonania procesu;
- zapewnienie przerobu dla własnych zasobów generalnego wykonawcy, zwiększenie stopnia ich wykorzystania – szczególnie dotyczy to jednostek operacyjnych wewnętrznych – sprawnych, efektywnych;
- minimalizacji utraconych korzyści finansowych z tytułu zlecania procesów podwykonawcom;
- zwiększenia zysku generalnego wykonawcy (różnicy między ceną kosztorysową – umowną, a rzeczywistym kosztem poniesionym przez generalnego wykonawcę – łącznie z kosztami stałymi utrzymywania zasobów, oraz kosztami procesów zleconych podwykonawcom).

2.2. Formalizacja opisu modelu

W modelu matematycznym problemu projektowania struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego przyjęto następujące założenia:

1) horyzont planowania $O=\langle 0, T_g \rangle$ został podzielony na jednostkowe przedziały (okresy) czasu o_t ($t = 1,2,\ldots,G$); funkcja $n(o_t)=t\cdot\delta$, gdzie δ – długość przedziału jednostkowego w jednostkach czasu przyjętych przy projektowaniu (np. zmiana robocza, dzień, tydzień), określa termin odpowiadający końcowi przedziału o_t;
2) proces $w_i : w_i \in W$ może być zrealizowany tylko przez jednego wykonawcę $h_m : h_m \in H = HW \cup HP$;
3) procesy są niepodzielne w czasie;
4) w przedziale czasu o numerze t proces w_i (i>1) może być realizowany wówczas, gdy wszystkie procesy bezpośrednio go poprzedzające zostały wykonane i gdy dostępne są zasoby odnawialne do jego realizacji.

Struktura systemu wykonawczego jednoznacznie (ale pośrednio) określona jest poprzez:

- dobór wykonawców do realizacji wszystkich procesów, a więc poprzez wartości zmiennej binarnej x_{im} (przyjmującej wartość 1, gdy proces w_i realizowany będzie przez wykonawcę h_m, wartość 0 w przeciwnym przypadku),
- termin zakończenia realizacji każdego procesu $w_i : w_i \in W$, czyli poprzez wartości zmiennej binarnej x_{it} przyjmującej wartość 1, gdy realizacja procesu w_i zakończy się w przedziale czasu o numerze t, wartość 0 w przeciwnym przypadku.

Model matematyczny do analizowanego zagadnienia zapisano z wykorzystaniem zmiennej $x_{imt}=x_{im}\cdot x_{it}$, zawierającej obie wymienione wyżej informacje.

Model matematyczny przyjmuje następującą postać:

minimalizuj (łącznie lub niezależnie):

- czas realizacji przedsięwzięcia:

$$\min TP = \sum_{m\in\left\{m:\, h_m\in H^i\right\}} \sum_{t=1}^{G} n\left(o_t\right)\cdot x_{Ymt} \tag{9}$$

- koszt realizacji przedsięwzięcia:

$$\min KP = \sum_{i=1}^{Y} \sum_{m\in\left\{m:\, h_m\in H^i\right\}} \sum_{t=1}^{G} k_{im}\cdot x_{imt} \tag{10}$$

- koszt realizacji procesów zleconych do wykonania podwykonawcom:

$$\min KPP = \sum_{i=1}^{Y} \sum_{m\in\left\{m:\, h_m\in HP\right\}} \sum_{t=1}^{G} k_{im}\cdot x_{imt} \tag{11}$$

przy spełnieniu następujących warunków (ograniczeń modelu):

- na wykonanie każdej operacji:

$$\sum_{m\in\left\{m:\, h_m\in H^i\right\}} \sum_{t=1}^{G} x_{imt} = 1, \qquad i = 1,2,\ldots,Y \tag{12}$$

- na dostępność zasobów odnawialnych:

$$\sum_{i=1}^{Y} \sum_{m\in\left\{m:\, h_m\in H^i\right\}} \sum_{q=t}^{t+t_{im}/\delta-1} V_{imz}\cdot x_{imq} \le d_{zt}, \qquad \begin{cases} z = 1,2,\ldots,R \\ t = 1,2,\ldots,G \end{cases} \tag{13}$$

- na dostępność wykonawców:

$$\sum_{i=1}^{Y} \sum_{q=t}^{t+t_{im}/\delta-1} P_{im}\cdot x_{imq} \le g_{mt}, \qquad \begin{cases} m = 1,2,\ldots,M \\ t = 1,2,\ldots,G \end{cases} \tag{14}$$

- na zachowanie kolejności wykonywania procesów:

$$\sum_{m\in\left\{m:\, h_m\in H^i\right\}} \sum_{t=1}^{G} \left(n\left(o_t\right) - t_{im}\right)\cdot x_{imt} - \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{G} n\left(o_t\right)\cdot x_{lmt} \ge 0, \qquad \begin{cases} i = 1,2,\ldots,Y \\ l \in \left\{l : w_l \in \Gamma_i^1\right\} \end{cases} \tag{15}$$

gdzie: Γ_i^1 – zbiór procesów bezpośrednio poprzedzających proces w_i,

- na zapewnienie odpowiedniego poziomu jakości robót. Wymaganie to realizowane jest poprzez zastosowanie etapu wstępnej selekcji podwykonawców. Jako elementy zbioru *H* wybierani są tylko ci podwykonawcy, którzy są wiarygodni i zapewniają na odpowiednim poziomie spełnienie wymagań jakościowych.

Ponieważ jednym z kryteriów optymalizacji jest minimalizacja czasu realizacji przedsięwzięcia, powyższe zadanie można sformułować następująco: wyznaczyć rozwiązanie x_{im} ($i=1,2,...,Y$; $m=1,2,...,M$), czyli dokonać doboru wykonawców procesów, przy spełnieniu warunków wykonania każdego procesu (12) i zapewnienie odpowiedniej jakości robót, dla którego koszt i czas realizacji przedsięwzięcia oraz koszt robót zleconych podwykonawcom są minimalne (rozpatrywane łącznie lub niezależnie); terminy realizacji procesów (wartości zmiennych x_{it} dla $i=1,2,...,Y$ oraz $t=1,2,...,G$), niezbędne do przeprowadzenia oceny rozwiązań x_{im}, obliczyć tak, aby czas realizacji przedsięwzięcia przez dany zbiór wykonawców procesów był minimalny, przy uwzględnieniu warunków na dostępność zasobów odnawialnych (13) i wykonawców (14) oraz na zachowanie kolejności realizacji procesów (15).

2.3. Metoda rozwiązania i algorytmizacja metody obliczeń

Między kryteriami oceny wariantów struktury systemu wykonawczego zachodzi konflikt, ponieważ wśród nich istnieją takie cele, że poprawa realizacji jednego z nich (ponad pewien poziom) jest możliwa jedynie kosztem pogorszenia poziomu realizacji przynajmniej jednego z pozostałych. W takim przypadku istnieje problem wyznaczenia rozwiązań kierowanych do realizacji. Wybrane rozwiązanie powinno pochodzić ze zbioru rozwiązań niezdominowanych, który można wyznaczyć za pomocą metod polioptymalizacyjnych. Wybór rozwiązania kierowanego do realizacji jest możliwy przy założeniu dysponowania dodatkowymi informacjami lub wymaganiami, uzyskiwanymi często dopiero po rozwiązaniu modelu, a których nie można było uwzględnić przy jego tworzeniu i budowie.

Rozwiązania niezdominowane można wyznaczyć stosując podejście zaczerpnięte z teorii programowania celowego (Galas i in. [3]), tworząc funkcję celu (skalaryzującą osiągnięcia – wartości wszystkich kryteriów), wyrażającą wielkość strat wynikających z występowania różnic pomiędzy realizacjami celów w generowanych rozwiązaniach a postulowanymi (czy idealnymi, ale możliwymi do osiągnięcia) przez decydenta poziomami ich realizacji.

Funkcja ta (zastępcze kryterium) przyjmuje następującą postać:

$$\min D_{\infty,\rho} = \max\left\{\lambda_1 \cdot \frac{TP - TP_{\min}}{TP_{\min}}, \lambda_2 \cdot \frac{KP - KP_{\min}}{KP_{\min}}, \left(1-\lambda_1-\lambda_2\right)\cdot \frac{KPP - KPP_{\min}}{KPP_{\min}}\right\} + \rho \cdot \left(\frac{TP - TP_{\min}}{TP_{\min}} + \frac{KP - KP_{\min}}{KP_{\min}} + \frac{KPP - KPP_{\min}}{KPP_{\min}}\right)$$
$$\lambda_1, \lambda_2 \in \langle 0,1 \rangle \tag{16}$$

gdzie: λ_1 – waga kryterium czasu realizacji przedsięwzięcia, λ_2 – waga kryterium kosztu realizacji przedsięwzięcia, *TP*, *KP*, *KPP* – określone są wzorami odpowiednio 9, 10, 11, TP_{min}, KP_{min}, KPP_{min} – rozwiązania zadań jednokryterialnych z ograniczeniami zadania wielokryterialnej optymalizacji, ρ – dostatecznie mała liczba.

Funkcja ta umożliwia wyznaczenie wyłącznie rozwiązań niezdominowanych (Hapke i in. [4]), ale nie zawsze wszystkich. W pracy rozwiązania niezdominowane (dla których wartość funkcji (16) jest minimalna) znajdowane będą z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego oraz heurystycznego algorytmu obliczania czasu realizacji przedsięwzięcia w warunkach ograniczonej dostępności zasobów. Występujące we wzorze (16) współczynniki λ_i (wagi) wyrażają preferencje decydenta odnośnie oceny odchyleń w realizacji poszczególnych celów.

Zasadnicza trudność wyboru rozwiązań końcowych, przeznaczonych do realizacji polega na określeniu współczynników wagowych uwzględniających preferencje decydenta. W pracy proponuje się zastosowanie do wyboru rozwiązań końcowych (określania istotności kryteriów) następujących metod:

A. Jeżeli decydent potrafi określić swoje preferencje w postaci ważności poszczególnych kryteriów, generowane jest rozwiązanie optymalne zadania z funkcją celu według wzoru (16).

B. Graficzne przedstawienie zależności (aproksymowanej) pomiędzy wartościami wag kryteriów a poziomami realizacji celów (wartościami kryteriów) *TP*, *KP* i *KPP* dla rozwiązań niezdominowanych (na podstawie generowanych wartości funkcji (9), (10), (11) dla skończonej liczby punktów – par wag (λ_1, λ_2)). Analiza przybliżenia zbioru rozwiązań niezdominowanych (w funkcji wag) umożliwi decydentowi ustalenie istotności kryteriów odpowiadających rozwiązaniu końcowemu.

C. Zastosowanie iteracyjnej metody R. E. Steuera – zaliczanej do grupy metod interaktywnych (dialogowych). W metodzie tej przyjmuje się, że jeśli zmieniając w sposób systematyczny wagi kryteriów, będziemy generować i przedstawiać do oceny decydentowi niewielkie liczebnie podzbiory zbioru rozwiązań kompromisowych, to decydent wybierając każdorazowo najwyżej przez siebie oceniane rozwiązanie, ukierunkuje poszukiwanie rozwiązania końcowego zadania zgodnie ze swoimi preferencjami. Procedura ta realizowana jest w trzech krokach:

1) obliczany jest początkowy zestaw siedmiu par wag; dla każdej pary wag poszukiwane jest, za pomocą algorytmu ewolucyjnego, rozwiązanie najlepsze, dla którego skalarna funkcja celu jest najmniejsza;
2) uzyskane rozwiązania niezdominowane przedstawiane są decydentowi do oceny; wskazuje on każdorazowo numer rozwiązania ocenionego przez niego najwyżej; w przypadku, gdy jest to rozwiązanie satysfakcjonujące decydenta (będzie kierowane do realizacji) procedura iteracyjna jest przerywana;
3) w kolejnym etapie obliczany jest nowy zestaw par wag i nowe rozwiązania przedstawiane do oceny decydentowi (krok 2).

Algorytm rozwiązania problemu został oprogramowany z wykorzystaniem notacji pascalowej i kompilatora języka Delphi.

W pracy, ze względu na ograniczenia możliwości zastosowania metod dokładnych, wynikające ze złożoności analizowanego problemu, oraz ze względu na niedoskonałość metod heurystycznych, poszukiwanie optymalnych wariantów budowy systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego dokonywane jest z wykorzystaniem metod metaheurystycznych, zaadaptowanych do potrzeb rozwiązywanego problemu. Rozwiązania niezdominowane (z punktu widzenia celów optymalizacji)

będą generowane z wykorzystaniem funkcji celu skalaryzującej osiągnięcia (wzór 16), pozwalającej na wyznaczenie dobrej reprezentacji całego zbioru rozwiązań niezdominowanych i umożliwiającej sprowadzenie zagadnienia do zadania optymalizacji jednokryterialnej. Rozwiązania optymalne (lub suboptymalne) przy zastosowaniu takiej funkcji celu są poszukiwane z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego, o potwierdzonej przydatności do rozwiązywania zagadnień harmonogramowania i niewielkiej złożoności obliczeniowej. Algorytm ewolucyjny jest wykorzystywany również do wyznaczenia minimalnego czasu realizacji przedsięwzięcia. Wybór rozwiązania końcowego – odpowiedniego wariantu struktury systemu wykonawczego – jest dokonywany przez decydenta na podstawie analizy reprezentacji całego lub tylko analizy części zbioru rozwiązań niezdominowanych (w metodzie dialogowej).

2.3.1. Algorytm ewolucyjny

Algorytm ewolucyjny zastosowano do minimalizacji czasu realizacji przedsięwzięcia (Jaśkowski i Sobotka [7]) oraz do poszukiwania rozwiązań niezdominowanych (w metodzie A, B, C). Metody ewolucyjne rozwiązywania problemów, w szczególności zadań optymalizacyjnych, bazują na zasadach, jakie można zaobserwować w ewolucji żywych organizmów (Michalewicz [12]). Program ewolucyjny jest algorytmem probabilistycznym, w którym generuje się populację osobników w każdej iteracji (generacji). Każdy osobnik przedstawia możliwe rozwiązanie rozpatrywanego zadania i w programie ewolucyjnym jest reprezentowany przez pewną strukturę danych (np. chromosomy w postaci wektora, macierze). Metody ewolucyjne stosowane są do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych w wielu dziedzinach nauki i różnych branżach gospodarki. Istnieje wiele przykładów ich zastosowań w budownictwie (Jaśkowski [8]), przy np.: optymalizacji konstrukcji wiązarów stalowych i ram żelbetowych, projektowaniu mostów, szacowaniu kosztów inwestycji mieszkaniowych, określaniu ryzyka niedotrzymania umowy przez wykonawcę, projektowaniu zestawów maszyn do robót ziemnych, projektowaniu zagospodarowania placu budowy. Algorytmy ewolucyjne wykorzystywane są również z powodzeniem do rozwiązywania problemów harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem różnych ograniczeń i warunków, m.in. maksymalizacja poziomu wykorzystania siły roboczej (Tong i in. [14]), wybór technologii realizacji procesów oraz poszukiwanie zależności między czasem i kosztem realizacji przedsięwzięć (Li i Love [10]), alokacja (Toklu [13]) i wyrównywanie zasobów (Hegazy [15]), minimalizacja kosztów finansowania przedsięwzięcia (Elazouni i Metwally [2]).

Inicjacja polega na utworzeniu populacji początkowej – ustalonej liczby osobników (chromosomów, czyli rozwiązań dopuszczalnych), reprezentowanych przez ciągi genów o określonej długości. W pracy zastosowano reprezentację osobników (rozwiązań dopuszczalnych) w postaci ciągu genów zawierających informacje o wykonawcach procesów i wartości priorytetu procesów. Populacja początkowa jest tworzona w algorytmie w sposób losowy.

Ocena osobników polega na obliczeniu wartości funkcji celu poszczególnych rozwiązań. W przypadku, gdy algorytm ewolucyjny jest wykorzystywany jako narzędzie do wyznaczenia minimalnego czasu, jest obliczany czas realizacji przedsięwzięcia. Przy poszukiwaniu rozwiązań niezdominowanych – wartość funkcji celu danej wzorem 20. Czas i koszt realizacji przedsięwzięcia oraz koszt procesów zleconych podwykonawcom obliczane są z wykorzystaniem heurystycznego algorytmu

opisanego w pkt. 2.3.2 (dla ustalonego zbioru wykonawców i wartości priorytetów procesów, zakodowanych w chromosomie).

Osobnik (chromosom), dla którego ocena (wartość funkcji celu) jest najlepsza (najmniejsza) jest zapamiętywany.

Algorytmy ewolucyjne są wykorzystywane do poszukiwania osobników najlepiej przystosowanych, dla których wartość funkcji przystosowania jest najwyższa. W pracy poszukiwane są rozwiązania zadań minimalizacji funkcji celu. W takim przypadku zachodzi konieczność przekształcenia minimalizowanej funkcji oceny do postaci maksymalizowanej funkcji przystosowania (w pracy zastosowano transformację γ, pozwalającą na skalowanie wartości funkcji przystosowania – łagodzenie różnic pomiędzy osobnikami).

Działanie algorytmu może być zatrzymane w dwóch przypadkach (warunki zatrzymania):

1) po wykonaniu określonej liczby iteracji (gdy numer bieżącej generacji jest większy od założonej wartości maksymalnej MAXGEN);
2) wtedy, gdy w wyniku jego działania nie uzyskuje się już poprawy rozwiązania, czyli gdy po pewnej liczbie iteracji MAXSTOP nie uzyskano rozwiązania lepszego niż w poprzednich generacjach.

Selekcja chromosomów polega na wyborze tych osobników, które będą brały udział w tworzeniu potomków do następnego pokolenia – generacji. Największe szanse w tworzeniu nowych osobników mają chromosomy o największej wartości funkcji przystosowania. W pracy, w procesie selekcji zastosowano metodę koła ruletki o wielkości pól zgodnej z wartościami funkcji dopasowania.

Zadaniem operatora krzyżowania jest rekombinacja chromosomów poprzez wymianę łańcuchów genów pomiędzy chromosomami rodziców. W pracy zastosowano metodę krzyżowania z „jednym punktem cięcia" tzw. *one-point crossover*. Dla każdego chromosomu z populacji rodzicielskiej jest generowana liczba losowa x z przedziału $\langle 0,1 \rangle$. Jeżeli $x<PKRZYZ$, gdzie *PKRZYZ* jest to prawdopodobieństwo krzyżowania (parametr systemu), rozpatrywany chromosom jest wybierany do rekombinacji. Wybrane chromosomy są kojarzone w pary. Łańcuchy genów w chromosomach rodziców przed punktem cięcia (ustalonym w sposób losowy) są nie zmieniane, a wymieniane są, między rodzicami, geny leżące za tym punktem.

Mutacja polega na losowej zmianie jednego lub więcej genów wybranego chromosomu, z prawdopodobieństwem równym częstości mutacji.

Ochrona najlepszego osobnika (tzw. strategia elitarna) stanowi szczególną dodatkową procedurę reprodukcji. Jeżeli najlepszy osobnik z bieżącego pokolenia jest gorszy niż zapamiętany najlepszy z poprzednich pokoleń, to ten ostatni zastępuje najgorszego osobnika bieżącej populacji.

Każdy osobnik w nowej populacji (generacji) w dalszym etapie działania algorytmu podlega ocenie stopnia jego przystosowania (obliczana jest wartość funkcji celu i funkcji dopasowania rozwiązania), niezbędnej do określenia wartości prawdopodobieństwa wyboru chromosomu do reprodukcji. Procedury selekcji, krzyżowania, mutacji, ochrony najlepszych osobników, oceny i obliczania wartości funkcji przystosowania są powtarzane cyklicznie aż do spełnienia warunku zatrzymania algorytmu.

2.3.2. Algorytm obliczania czasu realizacji przedsięwzięcia

Algorytm obliczania czasu realizacji przedsięwzięcia polega na iteracyjnym przydziale zasobów odnawialnych (wykonawców, środków produkcji) do wykonywania procesów i na ustalaniu terminów ich realizacji w najwcześniejszych możliwych momentach czasu, wynikających ze spełnienia warunku dostępności zasobów i relacji kolejnościowych pomiędzy procesami. Zasoby przydzielane są w pierwszej kolejności procesom o najwyższym priorytecie. Algorytm rozdziału zasobów umożliwia wyznaczenie najkrótszego czasu realizacji przedsięwzięcia, dla którego określono jednoznacznie wykonawców i priorytety procesów (informacje te zakodowane są w chromosomie reprezentującym dane rozwiązania dopuszczalne).

W algorytmie zastosowano oryginalny sposób zmiany momentu czasu, w którym przydzielane będą zasoby, niespotykany w dotychczasowych opracowaniach. Umożliwia on skrócenie czasu realizacji przedsięwzięcia, w przypadku gdy dostępność zasobów nie jest stała w czasie.

2.4. Weryfikacja metody obliczeń

W systemie komputerowym wspomagającym projektowanie struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego wyróżnić można dwie zasadnicze fazy pracy, których działanie wpływa na jakość uzyskiwanych wyników i tym samym rzutuje na wiarygodność proponowanej metody. Są to:

- wyznaczenie minimalnych (najmniejszych) wartości czasu, kosztu realizacji przedsięwzięcia oraz kosztu procesów zleconych podwykonawcom;
- wyznaczenie rozwiązań niezdominowanych, a w szczególności rozwiązania najlepiej spełniającego preferencje decydenta.

Opisany modelem matematycznym problem projektowania struktury systemu wykonawczego należy do klasy zadań harmonogramowania przedsięwzięć przy wielowariantowości sposobów wykonania procesów i ograniczeniach w dostępności zasobów odnawialnych (*multi-mode resource-constrained project scheduling problems*). Rozwiązanie tych zadań polega na określeniu optymalnych sposobów wykonania procesów, dla których przyjęte kryterium (kryteria) osiąga swoje optimum i spełnione są ograniczenia: kolejności realizacji procesów oraz dostępności zasobów i inne, np. w postaci zadanych przedziałów czasu, w których mogą być wykonywane procesy.

W przypadku, gdy kryterium optymalizacji harmonogramu jest minimalizacja czasu realizacji przedsięwzięcia, rozwiązanie tych zagadnień (w szczególności ocena rozwiązań dopuszczalnych) jest oparte na wykorzystaniu metod zbliżonych do stosowanych przy harmonogramowaniu przedsięwzięć z ograniczoną dostępnością zasobów (tzw. *single-mode resource-constrained project scheduling problems*).

Weryfikację wyników uzyskiwanych z opracowanego systemu komputerowego przeprowadzono zatem etapami, dla następujących problemów:

- harmonogramowania przedsięwzięć z ograniczoną dostępnością zasobów odnawialnych (tzw. *single-mode resource-constrained project scheduling problems*),
- harmonogramowania przedsięwzięć przy wielowariantowości sposobów wykonania procesów i ograniczeniach w dostępności zasobów odnawialnych (*multi-mode resource-constrained project scheduling problems*),

- wyznaczania rozwiązań niezdominowanych w problemach optymalizacji trójkryterialnej.

Przeprowadzone badania weryfikacyjne wyników uzyskiwanych za pomocą opracowanego systemu komputerowego z rozwiązania zadań testowych prezentowanych w literaturze przedmiotu, pozwalają na wysunięcie następujących wniosków:

- jakość uzyskiwanych wyników, w przypadku problemu minimalizacji czasu realizacji przedsięwzięcia z analizą dostępności zasobów, jest dobra a różnica w stosunku do rozwiązań optymalnych (lub suboptymalnych) wynosi 0-4,85%;
- uzyskano wszystkie rozwiązania optymalne w przykładach doboru sposobu wykonania procesów;
- jakość uzyskiwanych wyników w określonym czasie działania algorytmu ewolucyjnego, dla dużych problemów z dużą liczbą zależności kolejnościowych, zależy od doboru jego parametrów (wielkość populacji, prawdopodobieństwa krzyżowania i mutacji);
- czas działania algorytmu ewolucyjnego, dla małych problemów praktycznych, jest krótki, rozwiązanie uzyskiwane jest w początkowych generacjach, nie jest wymagany dobór parametrów algorytmu;
- system może być wykorzystywany do rozwiązywania zagadnień, w których procesy realizowane mogą być tylko w zadanych przedziałach czasu;
- przyjęty sposób skalaryzacji wartości funkcji celu w zagadnieniu trójkryterialnej optymalizacji harmonogramów zapewnił uzyskanie wszystkich rozwiązań niezdominowanych z wykorzystaniem wszystkich modułów systemu komputerowego.

3. Przykład zastosowania metody PSSWPB

Zastosowanie opracowanej metody projektowania struktury systemu wykonawczego przedstawiono na przykładzie doboru wykonawców procesów w ramach przedsięwzięcia realizowanego w systemie project management przez generalnego wykonawcę (Jaśkowski [6]). Przedsiębiorstwo budowlane (generalny wykonawca) opracowujące ofertę na wykonanie przedsięwzięcia, ze względu na ograniczone możliwości produkcyjne – ograniczoną liczbę i dostępność w czasie brygad roboczych oraz maszyn, przewiduje możliwość zlecania części prac podwykonawcom. Celem procesu projektowania jest opracowanie struktury systemu wykonawczego, przy której czas oraz koszt realizacji przedsięwzięcia są najmniejsze i zapewniają konkurencyjność oferty a także jednocześnie koszt procesów zleconych podwykonawcom jest najmniejszy, co zapewnia największy stopień wykorzystania zasobów generalnego wykonawcy. Dane do przykładu uzyskano z dokumentacji przetargowej oraz z ofert przedsiębiorstw przystępujących do przetargu na realizację całego przedsięwzięcia.

Przedsięwzięcie podzielono na pakiety robót, w taki sposób, aby każdemu pakietowi można było przydzielić dokładnie jednego wykonawcę. Graf zależności technologicznych pomiędzy pakietami robót oraz zakres inwestycji przedstawiono na Rys. 1.

Liczba kombinacji przydziału wykonawców pakietów w analizowanym przykładzie wynosi ok. $7{,}5 \cdot 10^{15}$.

Na podstawie wyników optymalizacji trójkryterialnej (metoda B) zbudowano wykresy przedstawiające aproksymowaną zależność pomiędzy wagami kryteriów a ich wartościami w rozwiązaniach stanowiących przybliżenie zbioru rozwiązań niezdominowanych. Analiza tych zależności umożliwia decydentowi wybór rozwiązania końcowego na podstawie dodatkowych informacji (preferencji) nie ujawnionych na etapie budowy modelu zagadnienia (np. ograniczenia w postaci dyrektywnego kosztu, czasu, kosztu procesów zleconych podwykonawcom w stosunku do wartości minimalnych; nieujawniona hierarchia celów).

W przykładzie założono dodatkowe ograniczenia, mogące pomóc w wyborze rozwiązania końcowego. Ustalono dyrektywny termin realizacji przedsięwzięcia na 340. dzień budowy. Przyjęto, że koszt realizacji nie może przekroczyć wartości 20500000 zł, oraz że koszt procesów zleconych podwykonawcom powinien być, przy tych założeniach, jak najmniejszy. Ustalenia te pozwoliły na wyznaczenie zbioru wartości wag, dla których prawdopodobne jest wyznaczenie rozwiązania satysfakcjonującego ($W1$=0,25-0,4; $W2$=0,5-0,65). W serii eksperymentów, dla pary wag $W1$=0,32 $W2$=0,63 uzyskano rozwiązanie spełniające ustalone warunki: $CZAS$=335 zm, $KOSZT$=20441530 zł, KP=8774230 zł. Rozwiązanie to uzyskano również w piątej iteracji interaktywnego algorytmu R. E. Steuera (metoda C).

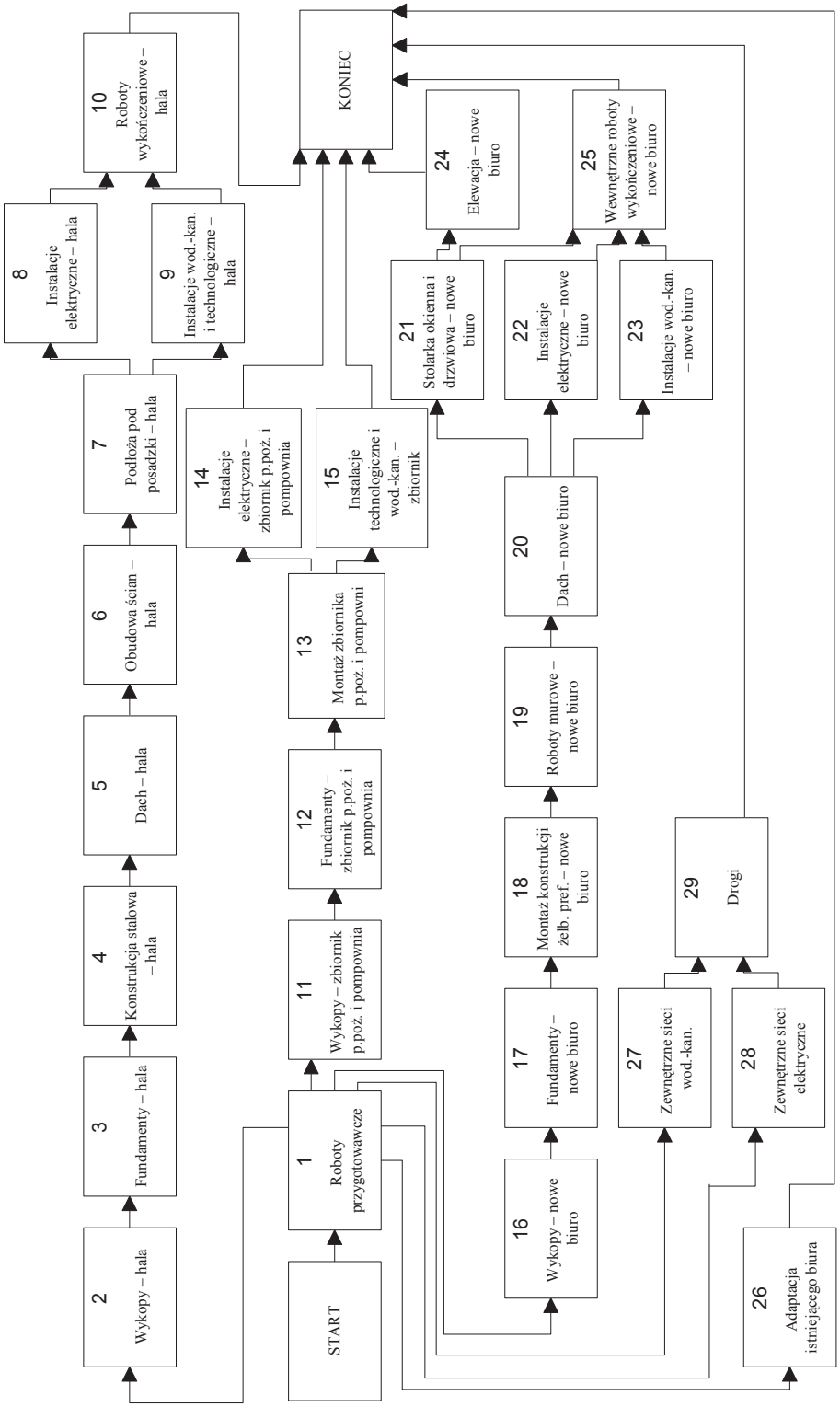
Schemat struktury systemu wykonawczego przedstawiono na Rys. 2. Poziome linie (belki) obrazują plan pracy wykonawców, linie pionowe – powiązania pomiędzy zaangażowanymi, w danym momencie czasu, wykonawcami.

4. Podsumowanie

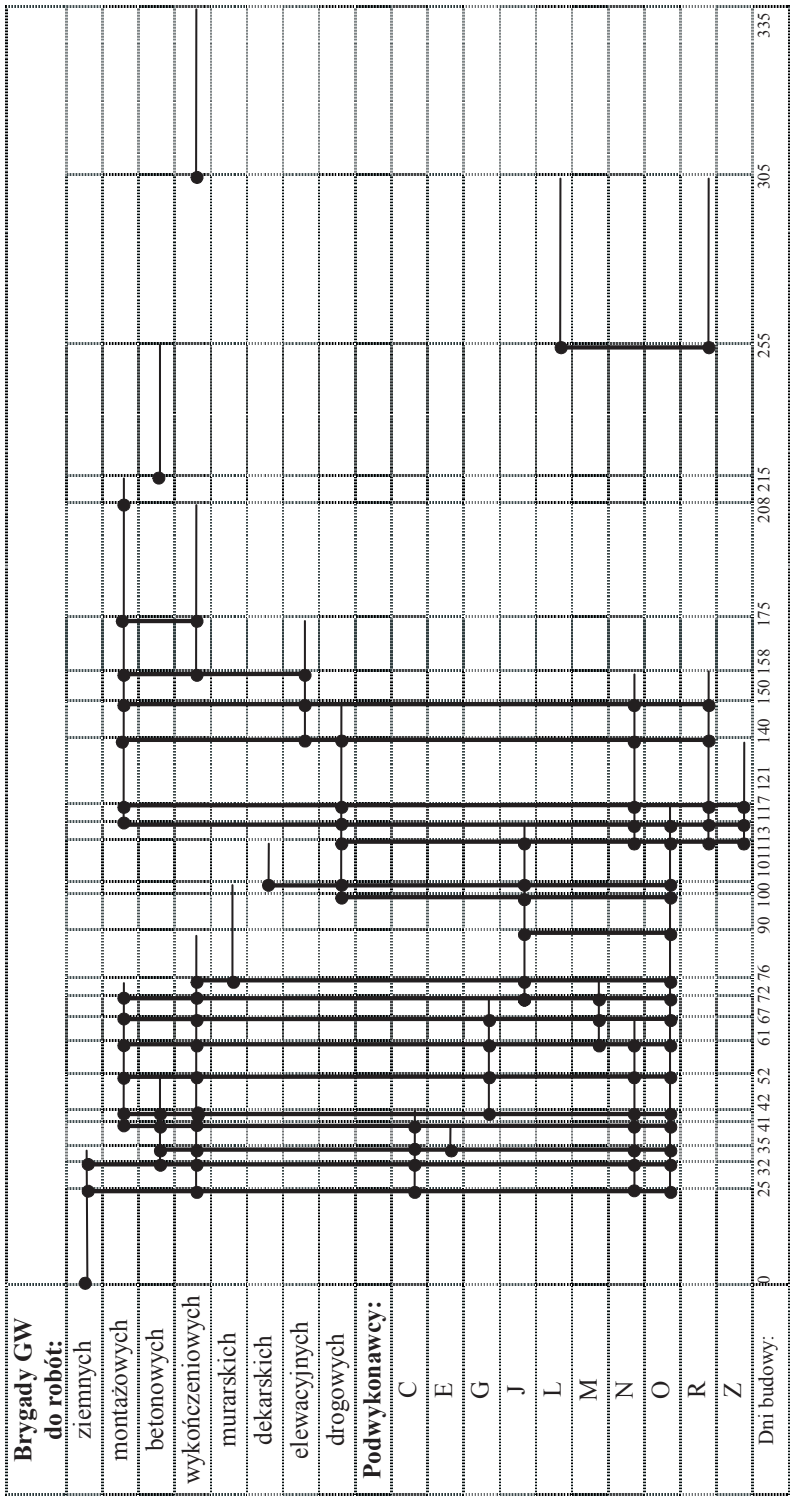
Opracowana metoda PSSWPB ma zastosowanie do projektowania przedsięwzięć budowlanych typu „kompleks operacji" (modelowanych z wykorzystaniem metod sieciowych) realizowanych w warunkach deterministycznych, obejmujących procesy niecykliczne, nierytmiczne i niejednorodne. Stopień wyodrębnienia wykonawców tych procesów, w zależności od celu analizy, może być różny (pojedynczy pracownicy, grupy lub zespoły robocze, maszyny, zestawy maszyn, brygady robocze, całe przedsiębiorstwa). Istnieje możliwość uwzględnienia i analizowania wariantowości technologii wykonania poszczególnych procesów przedsięwzięcia budowlanego. Jakkolwiek przedsięwzięcie budowlane często jest traktowane jako autonomiczny, zamknięty system, możliwość modelowania zmiennych w czasie ograniczeń zasobowych pozwala na rozpatrywanie jego jako elementu zbioru równolegle realizowanych zleceń przedsiębiorstwa.

Podstawowym obszarem zastosowań metody jest projektowanie struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia na etapie przygotowywania oferty przez przedsiębiorstwo wykonawcze. Nowością jest możliwość analizy zwiększenia zdolności produkcyjnej generalnego wykonawcy dzięki zatrudnieniu podwykonawców (zwiększeniu limitu dostępności zasobów).

Opracowany system komputerowy pozwala rozwiązywać również zagadnienia dwu- i jednokryterialnej optymalizacji struktury systemu wykonawczego i może być wykorzystany do wyboru najlepszych wariantów technologii wykonania procesów oraz jako podstawa do podjęcia decyzji o konieczności zatrudnienia podwykonawców.



Rys. 1. Graf zależności kolejnościowych pomiędzy pakietami robót w przykładzie.
Fig. 1. Graph of technological dependences between packages in example.



Rys. 2. Struktura systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego (przykład).
Fig. 2. Operating system structure of a construction project (example).

Literatura

[1] Biernacki J., Cyunel B., *Metody sieciowe w budownictwie*, Warszawa. Arkady, 1989.

[2] Elazouni A.M., Metwally F.G., *Finance-based scheduling: tool to maximize project profit Using Improved Genetic Algorithms*, ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 131, 4 (2005) 400-412

[3] Galas Z., Nykowski I., Żółkiewski Z., *Programowanie wielkokryterialne*, Warszawa. PWE, 1987.

[4] Hapke M., Jaszkiewicz A., Słowiński R., *Interactive analysis of multiple-criteria project scheduling problems*, European Journal of Operational Research, 107 (1998) 315-324.

[5] Hegazy T., *Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms*, ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 125, 3, (1999) 167-175.

[6] Jaśkowski P., *Metoda projektowania struktury systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego*, Praca doktorska. Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej. Politechnika Lubelska, 2003.

[7] Jaśkowski P., Sobotka A., *Scheduling construction projects using evolutionary algorithm*, ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 132, 8, (2006.) 861-870.

[8] Jaśkowski P, *Zastosowanie metod ewolucyjnych w harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych*, Rozdział w pracy zbiorowej pod. red. Kapliński O., *Metody i modele badań w inżynierii przedsięwzięć budowlanych*, Studia z Zakresu Inżynierii nr 57. Warszawa. Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, 2007, s. 205-223.

[9] Kasprowicz T., *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych*, Radom – Warszawa. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, 2002.

[10] Li H., Love P.E.D., *Using improved genetic algorithms to facilitate time-cost optimization*, ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 123, 3, (1997) 233-237.

[11] Marcinkowski R., *Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynieryjno-budowlanej*, Warszawa. Wojskowa Akademia Techniczna, 2002.

[12] Michalewicz Z., *Genetic algorithms + data structures = evolution program*, Berlin. Springer-Verlag, 1996.

[13] Toklu Y.C., *Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constraints*, Canadian Journal of Civil Engineering, 29, 3, (2002) 421-429.

[14] Tong T.K.L., Cheung S.O., Chan A.P.C., Tam C.M., *Genetic algorithm model in optimizing use of labour*, Construction Management & Economics, 19, 2, (2001) 207-215.

[15] Węglarz J., *Sterowanie w systemie kompleks operacji*, Warszawa – Poznań. PWN, 1981.

Designing the structure of a construction project operating system using evolutionary algorithm

Piotr Jaśkowski

Faculty of Civil and Sanitary Engineering, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: p.jaskowski@pollub.pl

Abstract: The paper discusses the problem of designing a construction project's organisation structure at the operating level, where tasks and processes are of "complex of operations" type. Such a system includes heterogeneous operating units (crews, teams) of a general contractor and cooperating external ones – subcontractors, that create a temporary organisation. Its structure changes according to the project schedule as the project advances. The author identified the problem of designing a construction project operating system structure from the point of a general contractor, built the system's model and formalised it mathematically. The contractor selection process (i.e. the selection of the system's elements) is described as the problem of triple-criteria optimisation of the schedule. The assessment of possible variants of the system's structure is made according the criteria crucial for the project's efficiency and the general contractor's objectives (i.e. minimisation of project duration and cost, and keeping subcontracting to minimum – as the general contractor is assumed to be interested in making full use of their own resources). To solve the problem, a method that uses metaheuristic approach has been worked out. An evolutionary algorithm (using stochastic processes) was adapted for solving the triple-criteria schedule optimisation problem in deterministic conditions. The author developed also a heuristic algorithm to allocate limited resources of variable availability. The solutions are generated by means of an achievement scalarising function, which is based on Tchebycheff utility function. The selection of final solution can be done by analysing the approximation of whole set of non-dominated solutions on the basis of total decision maker's preferences, or by means of Steuer's interactive method.

Key words: construction project scheduling, multicriteria optimisation, contractor selection