

HARMONOGRAMOWANIE PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH Z ZASTOSOWANIEM ALGORYTMÓW METAHEURYSTYCZNYCH

Zdzisław HEJDUCKI*, Michał PODOLSKI*

* Instytut Budownictwa, Politechnika Wroclawska
e-mail: zdzislaw.hejducki@pwr.wroc.pl
e-mail: michal.podolski@pwr.wroc.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 12.09.2012 r. Zweryfikowaną i poprawioną wersję po recenzjach i korekcie otrzymano w listopadzie 2012 r.

Przedstawiono badania autorów nad warunkami zastosowania algorytmów metaheurystycznych w metodach sprzężeń czasowych. Przeprowadzono analizę eksperymentalną z zastosowaniem tych algorytmów: przeszukiwania z zabronieniami, symulowanego wyżarzania, przeszukiwania genetycznego oraz algorytmu B&B. Użycie algorytmów metaheurystycznych, które są obecnie stosowane w rozwiązywaniu problemów teorii szeregowania zadań, pozwala na uzyskiwanie lepszych rozwiązań suboptymalnych niż otrzymywane obecnie algorytmem B&B. Doskonalenie metodyki harmonogramowania robót budowlanych z zastosowaniem metod sprzężeń czasowych (ang. TCM) 1, 7, 891013 jest podstawowym kierunkiem badań autorów. W szczególności opracowywane są problemy harmonogramowania procesów budowlanych o charakterze liniowym z uwzględnieniem optymalizacji czasowo-kosztowej.

Słowa kluczowe: harmonogramowanie robót budowlanych, optymalizacja, szeregowanie zadań, metaheurystyki

WSTĘP

Zagadnienia przedstawione w artykule dotyczą harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych i są związane z poszukiwaniem najlepszych algorytmów rozwiązujących zadania optymalizacyjne. Zadania te stanowią integralną część metod sprzężeń czasowych (ang. Time Coupling Methods - TCM) 1 78 91013. W zaprezentowanym artykule przedstawiono analizę eksperymentalną algorytmów metaheurystycznych możliwych do aplikacji w tych metodach. W metodach sprzężeń czasowych algorytmy te pozwalają na rozwiązywanie zadań optymalizacyjnych dotyczących minimalizacji czasu trwania przedsięwzięć budowlanych. W aktualnych zagranicznych opracowaniach dotyczących problematyki planowania robót budowlanych doskonalone są metody harmonogramowania z uwzględnieniem narzędzi sztucznej inteligencji: algorytmów genetycznych, sieci neuronowych oraz również zbiorów rozmytych. Analizowane i modyfikowane są np. sposoby harmonogramowania liniowego (LSM – *Linear Scheduling*

Method), metoda wykresów cyklicznych (LOB – *Line of Balance*) oraz planowania sieciowego typu CPM/PERT.

Metody sprzężeń czasowych umożliwiają planowanie w czasie i przestrzeni robót budowlanych i są naturalną konsekwencją przyjętej struktury podziału prac SPP oraz technologii robót. Ograniczenia technologiczne i organizacyjne ujęte są za pomocą sprzężeń czasowych w modelu macierzowym, umożliwiającym łatwe przeprowadzanie obliczeń polegających na rozwiązaniu zagadnienia kolejnościowego z zastosowaniem algorytmu podziału i ograniczeń (B&B – *Branch and Bound*) 1 13.

Metody sprzężeń czasowych różnią się od metod prezentowanych w literaturze zagranicznej (np. LSM, RSM, LOB, CPM/PERT) głównie tym, że na wstępie ustala się, zapotrzebowania zasobowe oraz założenia priorytetowe 113, tj.: w metodzie TCM I – brak przestojów grup roboczych, w metodzie TCM II – brak przestojów na działkach roboczych (obiektach), w metodzie TCM III – możliwe przestoje grup roboczych i robót na działkach roboczych. Metody TCM IV, V, VI uwzględniają ponadto inne, dodatkowe ograniczenia.

W niniejszej pracy zaprezentowano możliwości zastosowania w metodach sprzężeń czasowych doskonalszych algorytmów optymalizacyjnych, w miejsce algorytmu B&B. Przeprowadzono analizę eksperymentalną za pomocą testów obliczeniowych dla wybranych algorytmów metaheurystycznych: przeszukiwania z zabronieniami, symulowanego wyżarzania, przeszukiwania genetycznego 6.

1. BLOK OPTIMALIZACYJNY W METODACH SPRZEŻEŃ CZASOWYCH

Metody sprzężeń czasowych, które służą do optymalnego harmonogramowania robót budowlanych realizowanych w systemie potokowym, wykazują istotny związek z teorią szeregowania zadań (TSZ) 16. Problemy TSZ znajdują się w obszarze zagadnień badań operacyjnych i optymalizacji dyskretnej 26. Modele te najczęściej mają charakter deterministyczny i są stosowane podczas planowania produkcji w różnych gałęziach przemysłu, np.:

- chemicznego (np. procesy przetwarzania ropy naftowej);
- samochodowego (np. projektowanie tras transportowych podczas kompletowania części przeznaczonych do montażu);
- elektronicznego (np. montaż elementów urządzeń elektronicznych);
- ciężkiego (np. produkcja odkuwek w hucie);
- budownictwie (np. produkcja prefabrykatów żelbetowych, elementów z betonu komórkowego).

Dla zdecydowanej większości problemów praktycznych TSZ niemożliwe jest skonstruowanie efektywnych algorytmów ich rozwiązywania, głównie ze względu na silną NP-trudność problemów optymalizacyjnych w nich występujących. NP-trudność problemów optymalizacji dyskretnej polega na braku możliwości skonstruowania algorytmu dokładnego (znajdującego rozwiązanie optymalne), który rozwiązywałby dany problem w czasie zależnym od wyrażenia wielomianowego. Dla takich problemów są możliwe do skonstruowania tylko takie algorytmy dokładne, których czas obliczeń rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem rozmiarów problemów. W związku z tym, nawet

wielokrotny wzrost mocy obliczeniowej komputerów nie powoduje znaczącej poprawy szybkości rozwiązywania tego typu zagadnień algorytmami dokładnymi.

Na podstawie przeprowadzonej w pracy 16 analizy można stwierdzić, że poszczególne metody sprzężeń czasowych wykazują analogię do zagadnień przepływowych (flowshop) rozpatrywanych w ramach teorii szeregowania zadań (TSZ). W metodach sprzężeń czasowych zadania optymalizacyjne dotyczące kolejności realizacji działek roboczych (obiektów) są aktualnie rozwiązywane za pomocą algorytmu B&B 3, który nie pozwala na rozwiązywanie zadań o dużych rozmiarach (np. liczba obiektów większa niż 20-30) ze względu na wykładniczo rosnący czas obliczeń wraz ze wzrostem rozmiarów zadania 2. Dostarczane rozwiązania w takich przypadkach mogą być tylko suboptymalne i dalekie od rozwiązań optymalnych. W związku z tym istnieje potrzeba zastosowania innych algorytmów w celu rozwiązywania zadań optymalizacyjnych z zastosowaniem metod sprzężeń czasowych, które nie będą posiadały tego rodzaju ograniczenia.

Przedmiotem badań w niniejszej pracy jest zagadnienie harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych z użyciem metody TCM III ze sprzężeniami między środkami realizacji i frontami roboczymi 7 13. Metoda ta wykazuje ścisłą analogię do tzw. problemu przepływowego permutacyjnego zdefiniowanego w TSZ, który jest jednym z najczęściej rozwiązywanych problemów w TSZ. Metoda TCM III ma następujące założenia: m różnych grup roboczych lub brygad ma wykonać m robót w celu realizacji n obiektów lub działek roboczych przedsięwzięcia 1626:

- zbiór grup roboczych:

$$M = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_i, \dots, M_m\}, \quad (1)$$

- zbiór obiektów:

$$J = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_j, \dots, J_n\}. \quad (2)$$

Na realizację każdego obiektu $J_j \in J$ składa się m różnych robót ze zbioru $O_j = \{O_{1j}, O_{2j}, O_{3j}, \dots, O_{ij}, \dots, O_{mj}\}$, które są wykonywane w takiej samej kolejności przez wszystkie grupy robocze. Zakłada się, że robota $O_{ij} \in O_j$ jest realizowana nieprzerwanie przez grupę roboczą M_i przez czas $p_{ij} > 0$ (zbiór czasów trwania p_j robót ze zbioru O_j : $p_j = \{p_{1j}, p_{2j}, p_{3j}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{mj}\}$). Zakłada się ponadto, że w dowolnej chwili każda grupa robocza może wykonywać tylko jedną robotę oraz to, że tylko jedna robota danego obiektu może być wykonywana w danej chwili w przedsięwzięciu. Zadanie optymalizacyjne polega na znalezieniu uszeregowania S (harmonogramu) określonego przez podanie terminów rozpoczęcia robót oraz minimalizującego wartość funkcji celu, którą jest czas realizacji przedsięwzięcia, czyli wszystkich obiektów. Terminy te można określić ze wzoru o postaci rekurencyjnej:

$$C_{i, \pi(j)} = \max\{C_{i, \pi(j-1)}, C_{i-1, \pi(j)}\} + p_{i, \pi(j)}, \quad (3)$$

gdzie:

$$j = 1, \dots, n, i = 1, \dots, m, \pi(0) = 0, C_{i,0} = 0, C_{0,j} = 0.$$

Poszukiwana jest permutacja $\pi^* \in \Pi$, dla której:

$$C_{\max}(\pi^*) = \min_{\pi \in \Pi} C_{\max}(\pi), \text{ gdzie } C_{\max}(\pi) = C_{m, \pi(n)}. \quad (4)$$

Zmienną decyzyjną jest kolejność (permutacja) wykonywania obiektów przez wszystkie grupy robocze, która dla nich wszystkich jest taka sama i jest następująca: $\pi = (\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(k), \dots, \pi(n))$. Liczność zbioru wszystkich permutacji wynosi $n!$. Problem ten, z punktu widzenia złożoności obliczeniowej algorytmów optymalizacyjnych, już dla trzech grup roboczych należy do problemów silnie NP-trudnych 2.

2. ZASTOSOWANE METODY ROZWIĄZYWANIA ZADAŃ OPTYMALIZACYJNYCH

W przedstawionym w p.1 bloku obliczeniowym z zastosowaniem metody TCM III do harmonogramowania robót budowlanych będą zastosowane wybrane algorytmy optymalizacji dyskretnej w miejsce dotychczas stosowanego algorytmu B&B. W celu dokonania wyboru algorytmów rozważono następujące czynniki:

- jakość dostarczanych rozwiązań;
- czas obliczeń prowadzących do rozwiązań konkretnego problemu;
- elastyczność w formułowaniu nowych zagadnień (parametrów, ograniczeń, funkcji celu);
- łatwość implementacji programowej.

Obecnie najlepiej powyższe warunki spełniają algorytmy metaheurystyczne należące do grupy algorytmów poprawiających. Są one aktualnie stosowane w rozwiązywaniu wielu problemów optymalizacyjnych TSZ. Algorytmy metaheurystyczne wykorzystują mechanizmy poszukiwań analogiczne do zjawisk fizycznych lub występujących w naturze, np.: przeszukiwania zstępującego (*descending search*), przeszukiwania z zabronieniami (*tabu search*), przeszukiwania ewolucyjnego (*evolutionary search*), symulowanego wyżarzania (*simulated annealing*), przeszukiwania rozproszonego (*scatter search*), przeszukiwania mrówkowego (*ant search*), algorytmy memetyczne (hybrydowe) 26. Jakość dostarczanych rozwiązań za pomocą tych algorytmów z reguły jest dobra, lecz zależna od jego rodzaju. Podstawową wadą jest to, że za ich pomocą można uzyskać wynik przybliżony. Często jest on jednak bliski optymalnemu, zaś dla problemów o małych rozmiarach może być uzyskiwany wynik optymalny. Czas obliczeń jest zależny od warunków zakończenia pracy algorytmu (np. liczby iteracji), lecz nie rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem rozmiarów zadania, jak w przypadku metod opartych na schemacie B&B 2. Z reguły są to algorytmy elastyczne w odniesieniu do nowych zagadnień, np. wymagane są tylko zmiany w procedurach obliczania funkcji celu w przypadku ich zmiany, w przeciwieństwie do np. metod opartych na schemacie B&B, które każdorazowo wymagają formułowania funkcji dolnych i górnych ograniczeń, zależnie od postaci rozwiązywanego zagadnienia. Algorytmy poprawiające są na ogół łatwe do implementacji programowej, choć wersje bardziej rozbudowane mogą nastroić kłopotów. Z grupy algorytmów metaheurystycznych, ze względu na jakość dostarczanych rozwiązań oraz łatwość implementacji programowej, wybrano trzy algorytmy: przeszukiwania z zabronieniami, przeszukiwania genetycznego i symulowanego wyżarzania.

2.1. Algorytm przeszukiwania z zabronieniami (*tabu search*)

Metoda przeszukiwania z zabronieniami (TS) została zaproponowana przez F. Glovera w pracach 4 5. Powiela ona naturalny proces poszukiwania rozwiązania problemu realizowany przez człowieka. Podstawowa wersja algorytmu TS rozpoczyna działanie od określonego rozwiązania startowego. Następnie dla tego rozwiązania znaj-

dowane jest otoczenie. Otoczenie definiuje się jako zbiór rozwiązań, który można utworzyć po wykonaniu ruchów w danym rozwiązaniu, tj. przekształceń transformujących dane rozwiązanie w inne według ustalonych zasad. W otoczeniu poszukiwane jest rozwiązanie z najmniejszą wartością funkcji celu. To rozwiązanie staje się rozwiązaniem bazowym dla następnej iteracji. Wynikiem działania algorytmu jest najlepsze rozwiązanie z trajektorii poszukiwań.

Istotą metody TS jest zastosowanie historii poszukiwań, co zapobiega zatrzymaniu się trajektorii w ekstremum lokalnym oraz umożliwia wprowadzanie jej w bardziej obiecujące obszary poszukiwań. Najczęściej w tym celu używa się pamięci krótkoterminowej zwanej listą zabronień (lista tabu). Lista ta przechowuje przez ograniczony czas najświeższe atrybuty rozwiązań, ruchy prowadzące do tych rozwiązań lub atrybuty ruchów ostatnio rozpatrywanych rozwiązań. Zazwyczaj jest to dokonywane przez wprowadzenie stałej długości listy, co powoduje usunięcie elementu najstarszego w trakcie dopisywania elementu nowego. Z atrybutów elementów tej listy wynika, że niektóre przyszłe ruchy mogą nie rokować dobrze i dlatego będą traktowane jako zabronione. Zabronienie to może być jednak anulowane, jeśli tzw. funkcja aspiracji uzna dany ruch za korzystny. Jest to dodatkowa funkcja, której wartość dla danego rozwiązania może spowodować, że ruchy prowadzące do rozwiązania lub jego atrybuty nie znajdą się na liście tabu. Warunkami zakończenia pracy algorytmu mogą być: limit czasu, maksymalna liczba iteracji, osiągnięcie zadowalającej wartości funkcji celu lub wartości optymalnej. W pracy przyjęto formę algorytmu przedstawioną w pracy 15:

Niech $\pi \in \Pi$ będzie dowolną permutacją, LT listą tabu, c przyjętą funkcją celu, a π^* najlepszym do tej pory znalezionym rozwiązaniem.

Krok 1. Wyznaczyć otoczenie N_π permutacji π niezawierające elementów zabronionych przez listę LT.

Krok 2. Znaleźć permutację $\delta \in N_\pi$ taką, że $c(\delta) = \min\{c(\beta) : \beta \in N_\pi\}$.

Krok 3. Jeśli $c(\delta) < c(\pi^*)$, to $\pi^* \leftarrow \delta$

Umieścić atrybuty δ na liście LT; $\pi \leftarrow \delta$.

Krok 4. Jeżeli „Warunek_Zakończenia”, to STOP, w przeciwnym przypadku idź do Kroku 1.

2.2. Algorytm przeszukiwania genetycznego (*genetic search*)

Algorytmy przeszukiwania genetycznego (GS) wykorzystują zasady ewolucji występujące w naturze, które prowadzą do najlepszego przystosowania się (optymalizacji) osobników do warunków występujących w danym środowisku 11. Wykorzystują one populację osobników (rozwiązań), która następnie jest przetwarzana w trakcie selekcji, działań wywołanych przez użycie operatorów genetycznych oraz fazy przetrwania. Ze względów formalnych grupa tego rodzaju algorytmów jest ogólnie nazywana ewolucyjnymi. Ich szczególne przypadki, w których rozwiązanie jest reprezentowane przez wektor binarny, permutację itp., a proces przetwarzania jest realizowany przez zastosowanie operatorów krzyżowania i mutacji, nazywamy algorytmami przeszukiwania genetycznego (GS).

Populacją w algorytmach GS jest zbiór osobników reprezentujących rozwiązania. Każde rozwiązanie jest kodowane przez zbiór jego atrybutów zapisanych w materiale genetycznym (chromosomy, geny). Istnieje wiele sposobów kodowania, specyficznych dla różnych problemów optymalizacji, np. dla problemów przepływowych kolejne rozwiązania koduje się w chromosomie bezpośrednio za pomocą permutacji. Populacja jest przetwarzana za pomocą cyklicznie następujących po sobie procesów: reprodukcji, krzyżowania i mutacji oraz przeżycia lub selekcji. W fazie reprodukcji osobniki są powielane proporcjonalnie do miary przystosowania do środowiska. Funkcją adaptacji, będącą miarą przystosowania, może być np. wartość funkcji celu dla danego rozwiązania. Proces ten powoduje, że osobniki o lepszym przystosowaniu będą miały więcej potomków w następnych pokoleniach. Osobniki wybrane z populacji tworzą tzw. pulę rodzicielską, z której zostają wybrane pary tzw. rodziców dostarczające osobniki nowego pokolenia. Są one tworzone za pomocą operatora krzyżowania genetycznego. Następnie realizowany jest proces mutacji powodujący zmiany w materiale genetycznym, które występują z reguły z małym prawdopodobieństwem pozwalającym na powolne wprowadzanie innowacji w pokoleniu. W fazie przeżycia (selekcji) wybierane są osobniki, które wejdą w skład nowej populacji. Selekcja często jest wykonywana zgodnie z zasadą ruletki, w której większe szanse dawane są osobnikom lepiej przystosowanym. Warunkami zakończenia pracy algorytmu mogą być, podobnie jak w algorytmach TS: limit czasu, maksymalna liczba iteracji, osiągnięcie zadowalającej wartości funkcji celu lub wartości optymalnej. Metoda GS zawiera wiele elementów, które można swobodnie definiować: sposób kodowania chromosomów, operatory krzyżowania, mutacji, funkcja adaptacji, schemat wyboru puli rodzicielskiej i kojarzenia rodziców, schemat przeżywania. W niniejszym artykule przyjęto formę algorytmu przedstawioną w pracy 19:

Krok 0. Wygeneruj populację początkową $P(0)$, $t = 0$, oceń $P(0)$.

Krok 1. $t := t + 1$; Wybierz osobniki najbardziej dopasowane (selekcja).

Krok 2. Zmień wybrane osobniki (transformacja genetyczna: krzyżowanie, mutacja).

Krok 3. Oceń $P(t)$. Usuń najslabiej dopasowane osobniki (faza przetrwania).

Krok 4. Jeżeli spełniony jest warunek zatrzymania, to STOP, w przeciwnym przypadku wróć do kroku 1.

2.3. Algorytm symulowanego wyżarzania (*simulated annealing*)

W celu wyprowadzenia trajektorii poszukiwań z lokalnego ekstremum algorytm symulowanego wyżarzania (SA) wykorzystuje analogię do procesu termodynamicznego chłodzenia ciała stałego [12]. Stany ciała stałego są postrzegane jako poszczególne rozwiązania problemu, natomiast energia ciała – wartości funkcji celu. W trakcie fizycznego procesu studzenia temperatura redukowana jest powoli w celu utrzymania równowagi energetycznej.

Algorytm SA startuje z rozwiązania początkowego, najczęściej wybranego losowo. Następnie w każdej iteracji z otoczenia rozwiązania bazowego π wybiera się, według ustalonych zasad lub losowo, rozwiązanie π' . Staje się ono rozwiązaniem bazowym w następnej iteracji, jeśli wartość funkcji celu jest lepsza od aktualnego rozwiązania bazowego lub w przypadku przeciwnym może nim stać się z prawdopodobieństwem:

$$p = \exp(-\Delta / T_i), \quad (5)$$

gdzie:

$$\Delta = c(\pi') - c(\pi),$$

T_i – temperatura w bieżącej iteracji i ,

c – funkcja celu.

W każdej iteracji wykonywanych jest m losowań z otoczenia bieżącego rozwiązania bazowego. Parametr zwany temperaturą zmniejsza się tak, jak w naturalnym procesie wyżarzania. Najczęściej przyjmuje się jeden z dwóch schematów studzenia:

- geometryczny $T_{i+1} = \lambda_i T_i$;
- logarytmiczny $T_{i+1} = T_i / (1 + \lambda_i T_i)$.

gdzie:

$$i = 0, \dots, N - 1,$$

T_0 – temperatura początkowa;

T_N – temperatura końcowa;

N – liczba iteracji, λ_i – parametr.

W algorytmie z reguły przyjmuje się na początku określone wartości parametrów T_0 , T_N , N oraz wylicza się parametr λ_i . Powinna zachodzić zależność $T_0 > T_N$ oraz należy przyjmować T_N odpowiednio małe, bliskie zeru. Zastosowany w pracy algorytm SA składa się z następujących kroków:

Krok 0. Wyznacz rozwiązanie początkowe $\pi^0 \in \Pi$. Podstaw $\pi^{SA} = \pi^0$, $k = 0$, $T = T_0$.

Krok 1. Wykonaj x -razy kroki 1.1 – 1.3.

Krok 1.1. Podstaw $k := k + 1$. Wybierz losowo $\pi \in \square \square N(V, \pi^{k-1})$.

Krok 1.2. Jeżeli $c(\pi') < c(\pi^{SA})$, to podstaw $\pi^{SA} = \pi'$.

Krok 1.3. Jeżeli $c(\pi') < c(\pi^{k-1})$, to podstaw $\pi^k = \pi'$. W przeciwnym przypadku zaakceptuj rozwiązanie π' z prawdopodobieństwem $p = \exp((c(\pi^{k-1}) - c(\pi'))/T)$, tj. $\pi^k = \pi'$, jeżeli zaakceptowano rozwiązanie π' lub $\pi^k = \pi^{k-1}$, jeżeli nie zaakceptowano rozwiązania π' .

Krok 2. Zmień temperaturę T według określonego schematu chłodzenia, w którym:
 T_0 – temperatura początkowa, T_N – temperatura końcowa, N – liczba iteracji.

Krok 3. Jeżeli $T > T_N$, idź do kroku 1, w przeciwnym wypadku STOP.

3. ZASTOSOWANIE ALGORYTMÓW METAHEURYSTYCZNYCH W HARMONOGRAMOWANIU PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH Z UŻYCIEM METODY TCM III

Wymienione powyżej algorytmy zastosowano do rozwiązywania zadań optymalizacji występujących podczas harmonogramowania trzech przedsięwzięć budowlanych

z użyciem metody TCM III ze sprzężeniami między środkami realizacji i frontami roboczymi 713.

Przedmiotowe trzy przedsięwzięcia polegają na realizacji zbioru n obiektów o takiej samej technologii tj. wymagają realizacji tych samych rodzajów robót:

- osiedle budynków mieszkalnych (jednorodzinnych) realizowanych tylko do stanu surowego zamkniętego ($m = 7$ robót);
- sieci stacji paliw ($m = 11$ robót);
- osiedle budynków mieszkalnych (jednorodzinnych) realizowanych do stanu „pod klucz” ($m = 16$ robót).

Wartości parametrów sterujących w algorytmach TS, GS i SA przyjęto następująco:

- algorytm TS: długość listy tabu LT: 8, maksymalna liczba iteracji – 5000, otoczenie wyznaczane z zastosowaniem ruchu „wstaw”, długość listy reprezentującej pamięć długoterminową – 8, liczba iteracji bez poprawy funkcji celu (skok powrotny) – 1000;
- algorytm GS: licznosc populacji – $10n$, licznosc pokolenia jako odsetek licznosci populacji – $0,2 \times 10n = 2n$, prawdopodobienstwo krzyzowania (realizowanego za pomoca operatorow OX, PMX, CX) – 1,0, licznosc zbioru osobnikow mutowanych w pokoleniu $0,02 \times 10n = 0,2n$ (mutacja realizowana z zastosowaniem ruchu „wstaw”), prawdopodobienstwo mutacji – 0,1, licznosc zbioru osobnikow najgorzej przystosowanych z populacji, ktore sa wymieniane na nowe – $0,9 \times 10n = 9n$, liczba iteracji, po ktorej nastepuje wymiana i zmiana operatora krzyzowania na losowo wybrany z grupy zastosowanych – 100, calkowita liczba iteracji – 20000;
- algorytm SA: geometryczny schemat chlodzenia, wartosci temperatur: poczatkowa $T_0 = 60$, koncowa $T_N = 0,5$, liczba losowan wystepujaca w kroku 1: $0,5n$, calkowita liczba iteracji – 20000, otoczenie wyznaczane z zastosowaniem ruchu „wstaw”.

Dla kazdego rodzaju przedsiwziecia wygenerowano przyklady testowe o rozmiarach $n = 10, 20, 30$ obiektow (po 10 dla kazdego rozmiaru). Wartosci czasow trwania robot w obiektach (wyrazone w dniach roboczych) zostaly wygenerowane losowo z zastosowaniem rozkladu jednostajnego 1...60. Implementacja programowa algorytmu TS zostala dokonana w jezyku C++, a algorytmow GS i SA w systemie Mathematica. Kazdy z przykladow testowych byl rozwiazywany jednokrotnie za pomoca algorytmu TS, natomiast dziesieciokrotnie za pomoca algorytmow SA i GS (do dalszych porownan uwzględniany byl wynik sredni z prob). Przykladowe trajektorie poszukiwan lokalnych sa przestawione na rysunku 1. Ponadto wszystkie przyklady testowe zostaly rozwiazane jednokrotnie przy zastosowaniu uzywanego obecnie w TCM algorytmu B&B przy pomocy programu „ORGANIZATOR” 13. Ze wzgledu na wykladniczo rosnacy czas trwania poszukiwan rozwiazan optymalnych za pomoca tego algorytmu (uniemozliwiajacego praktyczne przeprowadzenie obliczen), dla przykladow o rozmiarach $n = 20, 30$ obiektow ustalono liczbe powrotow odpowiednio na 5 i 3 (dla $n = 10$, liczba powrotow wynosila rowniez 10). Liczba ta określa, ile razy algorytm powraca z danego wężla drzewa wariantow na poziom wyzszy. Liczba ta

mniejsza od liczby obiektów w przedsięwzięciu powoduje, że algorytm będzie dostarczał rozwiązania suboptymalne. Dla każdego przykładu obliczono średni błąd względny PRP względem wyniku otrzymanego z zastosowaniem algorytmu B&B (tabela 1):

$$\text{PRP}(A) = 100\%(\text{C}^A - \text{C}^{\text{B\&B}}) / \text{C}^{\text{B\&B}}, \quad (6)$$

gdzie:

C^A – funkcja celu uzyskana testowanym algorytmem TS, GS, SA;

$\text{C}^{\text{B\&B}}$ – funkcja celu uzyskana algorytmem B&B.

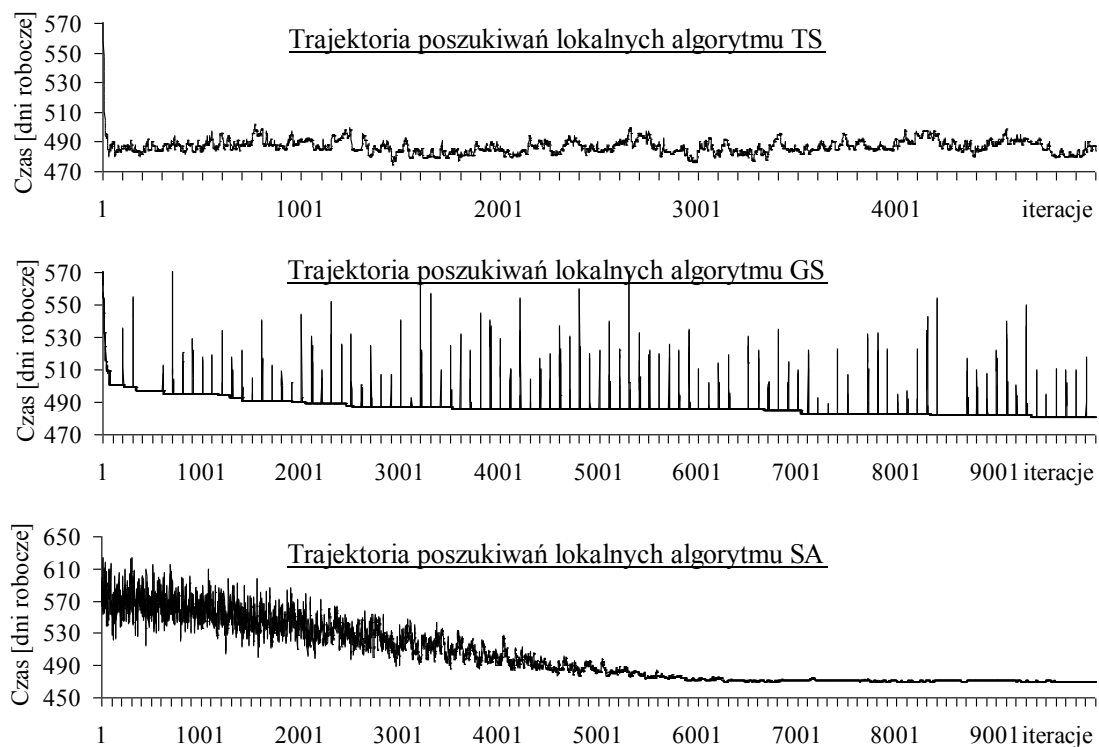
Na ich podstawie można stwierdzić, że:

- dla instancji o rozmiarach $n = 10$ algorytmy TS, SA dostarczały rozwiązań optymalnych, a algorytm GS średnio o 0,10% gorsze od optymalnych;
- algorytmy TS, SA, GS dostarczały rozwiązań lepszych od rozwiązań suboptymalnych otrzymanych za pomocą algorytmu B&B średnio o od 2,55% do 8,20% ($n = 20, 30$);
- najlepsze wyniki uzyskiwano z zastosowaniem algorytmu TS, gorsze – algorytmów SA i GS.

Tabela 1. Średnie błędy względne dla badanych trzech algorytmów metaheurystycznych

Rozmiar przykładu $n \times m$	PRP(TS) %	PRP(SA) %	PRP(GS) %
10x7	0,00	0,00	0,08
10x11	0,00	0,00	0,07
10x16	0,00	0,00	0,16
PRP średnio dla $n = 10$	0,00	0,00	0,10
20x7	-1,51	-1,71	-0,96
20x11	-4,42	-4,31	-3,39
20x16	-4,75	-4,66	-3,29
PRP średnio dla $n = 20$	-3,56	-3,56	-2,55
30x7	-2,03	-2,11	-1,59
30x11	-9,73	-9,35	-7,48
30x16	-12,84	-12,35	-10,43
PRP średnio dla $n = 30$	-8,20	-7,94	-6,50
średnie PRP %	<u>-3,92</u>	<u>-3,83</u>	<u>-2,98</u>

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 1. Przykładowe trajektorie poszukiwań lokalnych badanych metaheurystyk

Źródło: Opracowanie własne

Istotną cechą algorytmów metaheurystycznych jest ich uniwersalność i elastyczność zastosowania do rozwiązywania zagadnień z różnymi ograniczeniami i kryteriami (forma danego algorytmu jest zależna tylko od postaci zmiennej decyzyjnej). Jest to ważna cecha odróżniająca te algorytmy od stosowanego najczęściej do tej pory w TCM algorytmu B&B, który przy zmianie ograniczeń lub parametrów wymaga ponownego formułowania funkcji dolnych i górnych ograniczeń.

PODSUMOWANIE

Analiza porównawcza wyników otrzymanych na podstawie przeprowadzonych obliczeń pokazuje, że w przedstawionym eksperymencie obliczeniowym najlepsze rezultaty uzyskano w przypadku zastosowania algorytmu poszukiwania z zabronieniami – TS.

Kierunki dalszych badań dotyczą zagadnień optymalizacji dyskretnej i obejmują kontynuację prezentowanych powyżej zagadnień. Doskonalenie metodyki harmonogramowania robót budowlanych z zastosowaniem metod sprzężeń czasowych (ang. TCM) 178 91013 jest podstawowym kierunkiem badań autorów. W szczególności opracowywane są problemy harmonogramowania procesów budowlanych o charakterze liniowym z uwzględnieniem optymalizacji czasowo-kosztowej. W celu upowszechnienia możliwości obliczeń inżynierskich prowadzone są prace nad zastosowaniem programu EXCEL [22] do harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych w systemach potokowych.

LITERATURA

1. Afanasev V.A., Afanasev A.V., *Stream scheduling of works in civil engineering (Поточная организация работ в строительстве)*, St. Petersburg (in Russian) 2000.
2. Błazewicz J., *Złożoność obliczeniowa problemów kombinatorycznych*, WNT, Warszawa 1988.
3. Brown A.P.G., Łomnicki Z.S., *Some applications of the branch-and-bound algorithm for the machine scheduling problem*, [w:] "Operations Research Quarterly", nr 17/1966, pp. 173-189.
4. Glover F., *Tabu Search*, Part I., [in:] "ORSA Journal of Computing", no. 1/1989, pp. 190-206.
5. Glover F., *Tabu Search*, Part II., [in:] "ORSA Journal of Computing", no. 2/1990, pp. 4-32.
6. Hejducki Z., Podolski M., Uchroński M., *Zastosowanie algorytmów metaheurystycznych w rozwiązywaniu problemów optymalizacyjnych metod sprzężeń czasowych*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Inżynieria procesów budowlanych”, Wisła 2009.
7. Hejducki Z., Rogalska M., *Metody sprzężeń czasowych TCM*, [w:] „Przegląd Budowlany”, nr 2/2005, Warszawa 2005, s. 38-45.
8. Hejducki Z., *Scheduling Model of Construction Activity with Time Couplings*, [in:] "Journal of Civil Engineering and Management", no.4/2003, vol. IX, pp. 284-291.
9. Hejducki Z., *Sequencing problems in methods of organizing construction processes*, *Engineering*, [in:] "Construction and Architecture Management", no. 1/2004, vol. 11, 2004, pp. 20-32.
10. Hejducki Z., *Zarządzanie czasem w procesach budowlanych z zastosowaniem modeli macierzowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
11. Holland J.H., *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor, University of Michigan Press, Michigan 1975.
12. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P., *Optimization by simulated annealing*, *Science* 1983, 220, pp. 671-680.
13. Mrozowicz J., *Metody organizacji procesów budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe*, DWE, Wrocław 1997.
14. Nawaz M., Enscore Jr E.E., Ham I., *A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem*, 1983, OMEGA 11/1, pp. 91-95.
15. Nowicki E., *Metoda tabu w problemach szeregowania zadań produkcyjnych*, Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej PWr., Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
16. Podolski M., *Analiza nowych zastosowań teorii szeregowania zadań w organizacji robót budowlanych*, Praca doktorska, Raporty Inst. Bud. PWr. 2008, Ser. PRE, nr 5/08.
17. Podolski M., *Zagadnienie optymalizacji dyskretnej z kryteriami koszt/czas w planowaniu przedsięwzięć wieloobektowych*. *Technologia i zarządzanie w budownictwie*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr 91, Seria: Studia i Materiały nr 20, Wrocław 2008, s. 279-288.

18. Podolski M., *Zastosowanie metaheurystycznych algorytmów szeregowania zadań w harmonogramowaniu wieloobiektowych przedsięwzięć budowlanych. Technologia i zarządzanie w budownictwie*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr 87, Seria: Studia i Materiały nr 18, s. 147-156, Wrocław 2006.
19. Reeves C., *A genetic algorithm for flowshop sequencing problem*, [in:] "Computer and Operational Research", no 80/1995, pp. 397-403.
20. Rogalska M., Bożejko W., Hejducki Z., *Harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem algorytmu Tabu Search z rozmytymi czasami wykonania zadań*, [w:] „Przegląd Budowlany”, nr 7/8, 2009, R. 80, s. 76-80.
21. Rogalska M., Bożejko W., Hejducki Z., *Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling*, [in:] "Automation in Construction", no 18/2008, pp. 24-31.
22. Rogalska M., Hejducki Z., *Modelowanie przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem metod sprzężeń czasowych*, [w:] „Zeszyty Naukowe Akademii Ekonomicznej w Katowicach”, Katowice 2011, Praca w druku.
23. Skorupka D., *Identification and Initial Risk Assessment of Construction Projects in Poland*, [in:] "Journal of Management in Engineering", no 3/2008, July 2008, vol. 24, American Society of Civil Engineers 2008, pp. 120-127.
24. Skorupka D., *Neural Networks in Risk Management of a Project*, 2004 AACE International Transaction, (CSC.1.51– CSC.1.57), The Association for the Advancement of Cost Engineering, USA, Washington 2004.
25. Skorupka D., *Risk Management in Building Projects*, AACE International Transaction, (CSC.1.91– CSC.1.96), The Association for the Advancement of Cost Engineering, USA, Orlando 2003.
26. Smutnicki C., *Algorytmy szeregowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.

SCHEDULING OF CONSTRUCTION PROJECTS WITH APPLICATION OF METAHEURISTIC ALGORITHMS

Summary

The paper presents the authors' research on the application of metaheuristic algorithms in Time Coupling Methods (TCM). The experimental analysis of algorithms: tabu search, genetic search, simulated annealing and B&B algorithm was conducted in the paper. The application of these algorithms, which are currently used to solve job scheduling problems, allows one to obtain better suboptimal solutions than with the currently used B&B algorithm. The main branch of the authors' research is developing the methodology of construction works scheduling with the application of TCM 17,8,9 1013. The problems of scheduling linear construction works using time-cost optimisation are worked out.

Keywords: *construction works scheduling, optimisation, job scheduling, metaheuristics*