

Arkadiusz Korzeniowski

Akademia Ekonomiczna we Wrocławiu

MAKSYMALIZOWANIE WARTOŚCI BIEŻĄCEJ NETTO (NPV) W PROBLEMACH HARMONOGRAMOWANIA PRZEDSIĘWZIĘĆ Z NIEUSTALONYMI WPŁYWAMI ZALEŻNYMI OD PONIESIONYCH KOSZTÓW

1. Wstęp

Harmonogramowanie przedsięwzięć jest obszarem zainteresowań naukowych od przeszło pół wieku. Podstawowe kryterium celu w takich zagadnieniach stanowi minimalizacja czasu trwania przedsięwzięcia. W ten sposób niejednokrotnie zaniedbuje się elementy finansowe projektu, jak choćby rentowność. Przeciwwagą tego podejścia będzie harmonogramowanie przy maksymalizowaniu łącznej wartości bieżącej netto wszystkich kosztów i wpływów, jakie występują w przedsięwzięciu (maksymalizacja *net present value* – NPV projektu z punktu widzenia podwykonawcy). W praktyce występuje duża różnorodność w kształtowaniu się struktury wpływów i kosztów przedsięwzięcia, zależą one bowiem od warunków kontraktu, charakteru przedsięwzięcia i branży projektu, co powoduje, że można otrzymać wiele modeli. Wyróżniają się one nierzadko trudnością w ich konstruowaniu oraz tym, że należą najczęściej do złożonych problemów kombinatorycznych, dla których brakuje optymalnych rozwiązań.

2. Problemy harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją NPV

Maksymalizowanie wartości bieżącej przedsięwzięcia przy harmonogramowaniu ważne będzie przede wszystkim dla projektów o długim horyzoncie czasu. Trudno przekonywać o wadze tego kryterium, jeśli projekt zamyka się w przedziale kilkutygodniowym. Oszczędności z tytułu zastosowania maksymalizowania NPV mogą być wtedy dużo mniejsze niż koszty i czas poświęcony znalezieniu optymalnego harmonogramu. Drugim czynnikiem uzasadniającym stosowanie harmonogramowania z maksymalizacją NPV będzie skala wielkości przepływów pieniądza-

nych – przede wszystkim w przedsięwzięciach związanych z dużymi kosztami i wpływami poszukiwane będą techniki harmonogramowania z maksymalizacją NPV. Wydaje się, że istnieje dodatnia korelacja między horyzontem czasu a wielkością przepływów pieniężnych. Z tego też względu zastosowanie technik harmonogramowania z maksymalizacją NPV będzie miało miejsce głównie w ramach przedsięwzięć o długim horyzoncie czasu i z wysokimi kosztami bądź wpływami pieniężnymi. W takim środowisku projektów będzie istnieć zapotrzebowanie na techniki harmonogramowania, pozwalające wyznaczyć optimum przy maksymalnym NPV. Przedsięwzięcia tego rodzaju można znaleźć choćby w sektorze publicznym czy branży budowlanej. Wzrastająca złożoność obecnych czasów wymaga od przedsiębiorstw częstego zlecania pewnych projektów (coraz częściej dużych rozmiarów) do realizacji na zewnątrz. W takich przedsięwzięciach również może odgrywać coraz ważniejszą rolę maksymalizacja NPV. Inną okolicznością uzasadniającą maksymalizację NPV projektu będzie duży koszt pozyskania kapitału i wysokie stopy procentowe. Z kolei występowanie znacznej inflacji może stanowić poważny hamulec [Herroelen, van Dommelen, Demeulemeester 1997, s. 97-121] w stosowaniu kryterium maksymalizacji NPV w harmonogramowaniu projektów.

Problemy harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją NPV można podzielić na co najmniej kilka grup. Klasyfikacja ich została przeprowadzona między innymi przez W.S. Herroelena – wyodrębniając pięć podstawowych rodzajów modeli, nad którymi prowadzone są badania w ostatniej dekadzie [Herroelen, van Dommelen, Demeulemeester 1997, s. 97-121]:

- modele bez ograniczeń zasobowych, przypadek deterministyczny i stochastyczny (*deterministic and stochastic unconstrained max-npv problem*),
- modele z ograniczeniami zasobu odnawialnego, przypadek deterministyczny (*deterministic resource constrained max-npv problem with renewable resource*),
- modele z ograniczeniami zasobów nieodnawialnych i podwójnie ograniczonych, przypadek deterministyczny (*deterministic resource constrained max-npv problem with nonrenewable and doubly constrained resource*),
- modele bez ustalonych terminów i wielkości przepływów pieniężnych (*payment scheduling problem*).

Poszczególne kategorie wyróżnione przez W.S. Herroelena stanowią bardzo ogólny i nie zawsze rozłączny podział, wynikający przede wszystkim z potrzeb praktyki (niektóre problemy można zaklasyfikować jednocześnie do dwóch grup, a innych zagadnień nie da się zaklasyfikować do żadnej z kategorii). Można proponować rozłączny podział problemów harmonogramowania z maksymalizacją NPV ze względu na następujące kryteria podziału: a) modele deterministyczne i modele stochastyczne b) występowanie lub niewystępowanie ograniczeń zasobowych c) sposób kształtowania się przepływów pieniężnych w projekcie – związane (każdy przepływ pieniężny przyporządkowany jest określonej czynności albo określönemu zdarzeniu) i niezwiązane terminy d) sposób kształtowania się przepływów pieniężnych w projekcie – znana albo nieznana wysokość każdego przepływu pie-

niężnego. Na tej podstawie można już wyróżnić szesnaście rodzajów modelowanych przedsięwzięć z maksymalizacją NPV. Szczegółowo zostaną opisane te z nich, które są obiektem zainteresowań autora.

Do pierwszej grupy – **problemy maksymalizowania NPV w przedsięwzięciach deterministycznych ze związanymi i znanymi przepływami pieniężnymi bez ograniczeń zasobowych** (w ramach *deterministic unconstrained max-npv problem*) – zaliczymy zagadnienia deterministyczne, gdzie ustalone są czasy trwania poszczególnych czynności, relacje między czynnościami oraz wielkość każdego przepływu pieniężnego jest znana i do każdego przepływu pieniężnego przyporządkowana jest określona czynność lub zdarzenie, kiedy ma nastąpić przepływ gotówki. Dodatkowym założeniem bywa często wymagany termin zakończenia projektu (*deadline*). Zagadnieniem tym zajmowano się najwcześniej, istnieje kilka algorytmów rozwiązujących to zagadnienie. W tej grupie modeli można przedstawić wiele praktycznych przedsięwzięć. Przykładem będzie projekt, gdzie znane są koszty wszystkich czynności podwykonawcy i ustalona wysokość poszczególnych wpływów pieniężnych (pochodzących od właściciela projektu-zlecającego), które są związane z wykonaniem pewnych czynności bądź nastąpieniem zdarzeń stanowiących kamienie milowe przedsięwzięcia.

Drugą grupę stanowią **problemy maksymalizowania NPV w przedsięwzięciach deterministycznych ze związanymi i znanymi przepływami pieniężnymi, z ograniczeniami zasobowymi** (w ramach *deterministic resource constrained max-npv problem*). Są one poszerzeniem wyżej opisanych zagadnień o ograniczone zasoby w czasie realizacji projektu. Tutaj również dodatkowym założeniem bywa często wymagany termin zakończenia projektu (*deadline*). Problem ten, jak większość problemów harmonogramowania związanych z ograniczonymi zasobami, należy do klasy złożonych zadań kombinatorycznych. W przypadku zasobu odnawialnego znany jest efektywny algorytm rozwiązujący te zagadnienie.

Kolejną grupę modeli harmonogramowania przejrzeć można zilustrować na podstawie projektu, w którym właściciel przedsięwzięcia zleca jego realizację podwykonawcy. Podobnie jak w przykładzie ilustrującym pierwszą z wyróżnionych kategorii (problemy maksymalizowania NPV w przedsięwzięciach deterministycznych ze związanymi i znanymi przepływami pieniężnymi bez ograniczeń zasobowych) właściciel reguluje koszty przedsięwzięcia dla podwykonawcy zgodnie z postępowaniem prac projektowych. Jednak wysokość wpływów nie jest znana przed harmonogramowaniem (można jedynie założyć, że jest równa poniesionym kosztom czynności, plus uzgodniona marża podwykonawcy) oraz ich terminy nie są związane z żadnymi czynnościami ani zdarzeniami. Tę grupę stanowią **deterministyczne problemy maksymalizowania NPV z nieznanymi i niezwiązanymi wpływami zależnymi od poniesionych kosztów**. Jak potwierdzają wyniki badań, rozwiązania takich modeli mogą być użyteczne nie tylko w ramach zatwierdzonych już projektów, lecz także na etapie negocjowania między podwykonawcą a właścicielem projektu warunków płatności. Nierzadko na temat wpływów (koszty pod-

wykonawcy są zazwyczaj dokładnie przez niego określone) podejmuje się negocjacje z właścicielem zarówno co do ich wysokości, jak i terminów. Znana jest jedynie liczba wpływów w czasie realizacji projektów (choć to też może być przedmiotem pertraktacji). Opisana grupa modeli może być wykorzystywana także przy tworzeniu ofert w przetargach na wykonanie projektu. Podwykonawca, znając swoją wymaganą stopę zwrotu z realizacji przedsięwzięcia, jak i samo przedsięwzięcie (czynności i związane z nimi koszty), jest w stanie przedstawić ofertę bardziej konkurencyjną dla właściciela, zwiększając wartość projektu poprzez techniki harmonogramowania maksymalizujące NPV, a nie tylko poprzez wzrost wielkości wymaganych wpływów od właściciela. W grupie tych modeli brakuje optymalnych algorytmów, pozwalających na uzyskanie satysfakcjonującego rozwiązania nawet dla średniej wielkości przedsięwzięć (kilkanaście czynności).

Autor nie będzie zajmował się w dalszej części pracy analizą innych modeli harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją NPV. Modele stochastyczne stanowią obszar najmniej zbadanych problemów, rozpatrywane były nieliczne warianty tych zagadnień, uzyskiwane wyniki często nie są zadowalające. Podobnie brakuje, wedle wiedzy autora, rozwiązań modeli w ramach *payment scheduling problem*, z ograniczeniami zasobowymi. Nie zostały także opisane zagadnienia deterministyczne (w ramach *payment scheduling problem*) ze znanymi i niezwiązanymi wpływami (zmiennymi decyzyjnymi będą tu terminy wykonywania czynności oraz wpływów) jako nie rozpatrywane w badaniach i mało interesujące ze względu na interpretację praktyczną. Nie zostanie bliżej opisana grupa deterministycznych problemów maksymalizowania NPV ze związanymi wpływami bez określenia jednak ich wysokości (w ramach *payment scheduling problem*), choć wydaje się bardzo interesująca (przykład: przedsięwzięcie, gdzie wpływy są związane z wyznaczonymi „kamieniami milowymi”, nie są ustalone jednak ich wielkości nominalne). Oczywiście w ramach wszystkich opisanych grup problemów, można wprowadzać wiele modyfikacji (np. wpływy z ustaloną częstotliwością, wpływy proporcjonalnie do stopnia postępu czynności – a więc nie tylko za zakończone czynności, różne ograniczenia zasobowe). W następnej części przedstawione zostaną modele dotyczące trzech opisanych najszerzej zagadnień.

3. Modele harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją NPV i stosowane metody znajdowania ich rozwiązań optymalnych

Pierwszym historycznie modelem harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją NPV był model rozważany przez A.H. Russela [1970]. Należy on do pierwszej grupy wyróżnionych zagadnień harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją NPV. A.H. Russel, zakładając deterministyczne czasy trwania czynności, reprezentację projektu na sieci AoA (czynności na łukach), znane przepływy pieniężne, związane z każdym zdarzeniem, sformułował model harmonogramowa-

nia przedsięwzięcia jako zadanie z liniowymi ograniczeniami i nieliniową funkcją celu.:

Ograniczenia:

$$T_{s(k)} + d_k \leq T_{e(k)} \quad \text{dla } k = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$T_1 \geq 0 \quad (2)$$

Funkcja celu:

$$\sum_{i=1}^M C_i e^{-\alpha T_i} \rightarrow \max \quad (3)$$

gdzie: T_i – moment nastąpienia i -tego zdarzenia (*jedyne zmienne decyzyjne*),

N – liczba czynności,

d_k – czas trwania k -tej czynności,

M – liczba zdarzeń (węzłów) ponumerowanych kolejnymi liczbami naturalnymi,

C_i – przepływ pieniężny związany z i -tym zdarzeniem,

$s(k)$ – numer początkowego węzła (zdarzenia) k -tej czynności,

$e(k)$ – numer końcowego węzła (zdarzenia) k -tej czynności,

α – stopa dyskontowa.

Do obliczenia wartości bieżącej przedsięwzięcia zastosowano tutaj dyskontowanie ciągle wszystkich przepływów pieniężnych do czasu rozpoczęcia projektu. Iteracyjne podejście Russella do przedstawionego modelu polegało na zastępowaniu w kolejnych krokach wykładniczej funkcji celu jej liniową aproksymacją wielomianu Taylora i rozwiązywaniu problemów dualnych do tak powstałych zagadnień liniowych.

Warto zauważyć, że stosując przedstawiony model, rozważa się tylko przepływy pieniężne w zdarzeniach projektu – gdzie może się schodzić wiele czynności mających różne przepływy pieniężne. Chcąc rozważać przepływy związane z każdą z czynności osobno, należy dodać czynności pozorne po wszystkich czynnościach mających przepływy pieniężne – tak aby każda czynność związana z przepływem pieniężnym miała przyporządkowane własne zdarzenie, w którym można umiejscowić jej przepływ pieniężny.

Rozwinięciem badań nad tym modelem zajął się R. Grinold [Icmeli, Erenguc 1996, s. 80-91], który dodaje do modelu ograniczenie związane z zakończeniem przedsięwzięcia w określonym terminie dd (*deadline*):

$$T_G \leq dd \quad (4)$$

gdzie: G – numer sztucznego zdarzenia w sieci przedsięwzięcia, następującego po wszystkich innych zdarzeniach.

R. Grinold rozwiązuje model poprzez jego transformację do równoważnego problemu liniowego. Kolejne prace na ten temat prezentują S.E. Elmaghraby i W.S. Herroelen [1990, s. 35-40]. Ich rekursywny algorytm opiera się na bardzo

intuicyjnym założeniu: zdarzenia związane z ujemnymi przepływami pieniężnymi powinny nastąpić możliwie najpóźniej, a zdarzenia z dodatnimi przepływami pieniężnymi jak najszybciej. S.E. Herroelen, W.S. Demeulemeester i P. Van Dommelen [1997] przedstawiają podobne podejście dla przedsięwzięć na sieci z czynnościami w węzle (AoN – *activity on node*). Opisane algorytmy zostały porównane pod względem ich efektywności, w wyniku czego można stwierdzić wysoką i zadowalającą skuteczność rekursywnego algorytmu S.E. Elmaghraby'ego i W.S. Herroelena w znajdowaniu optimum dla takich problemów.

Kolejnym modelem problemów harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją NPV będzie poszerzenie wcześniejszego modelu (równania (1)-(4)) o ograniczenia zasobowe. Rozważy się przypadek zasobów odnawialnych (stan zasobu w każdej jednostce czasu jest ograniczony pewną stałą). Wtedy zgodnie z wcześniejszymi oznaczeniami należy dodać ograniczenia (w rzeczywistości jest to dużo bardziej skomplikowany układ ograniczeń, jako że należałoby wprowadzić zmienne binarne oznaczające, czy dana czynność jest wykonywana w przedziale czasu $[t-1, t]$):

$$\sum_{k \in S_t} r_{kw} \leq a_w \quad \text{dla } t = 1, \dots, T_G \text{ oraz } w = 1, \dots, W \quad (5)$$

gdzie: W – ilość rozpatrywanych zasobów,

a_w – dostępna stała ilość w -tego zasobu w jednostce czasu,

S_t – zbiór wszystkich czynności będących w realizacji w przedziale czasu $[t-1, t]$,

r_{kw} – zużycie w -tego zasobu przez czynność k .

Algorytm rozwiązujący przedstawiony model zaprezentowali O. Icmeli oraz S.S. Erenguc [1996, s. 1395], a następnie udoskonalili M. Vanhoucke, E. Demeulemeester i W.S. Herroelen [2001, s. 1113]. Opiera się on na metodzie podziału i ograniczeń, w pierwszym kroku wyznaczany jest optymalny harmonogram przedsięwzięcia, bez ograniczeń zasobowych dla równań (1)-(4) (za pomocą wcześniej opisanego algorytmu [Elmaghraby, Herroelen [1999, s. 35-49]]). Uzyskane rozwiązanie stanowi wierzchołek UB_0 w drzewie poszukiwań. Następnie, jeśli uzyskane rozwiązanie generuje konflikt zasobów – ograniczenie (5), rozważa się wszystkie warianty minimalnych opóźnień poszczególnych czynności poprzez wprowadzanie relacji poprzedzania-następstwa między konfliktowymi czynnościami. Dla otrzymanych w ten sposób wariantów, ponownie bez ograniczeń zasobowych, wyznacza się optymalny harmonogram maksymalizujący NPV algorytmem Elmaghraby'ego i Herroelena – tworząc tym samym kolejne wierzchołki UB_i drzewa poszukiwań. Potwierdzona jest wysoka skuteczność obliczeniowa tego algorytmu, na podstawie testów przeprowadzonych na różnych przykładach przedsięwzięć.

Ostatni z przedstawionych modeli dotyczy maksymalizowania NPV w deterministycznych przedsięwzięciach z niezwiązanymi i nieznanymi wpływami. Wpływy (dodatnie przepływy pieniężne występujące w projekcie) w danej jednostce

czasu są zależne od kosztów czynności zakończonych do tej chwili, powiększonych o ustaloną procentowo marżę podwykonawcy. Przyjmuje się jeszcze założenie, wynikające z praktyki gospodarczej, że podwykonawca nie otrzymuje całości tych wpływów (poniesionych kosztów powiększonych o marżę) aż do zakończenia projektu – tytułem zabezpieczenia właścicielowi wykonania przedsięwzięcia. Zakłada się prezentację czynności na sieci typu AoA (czynność na łukach), aby kontynuować wcześniejsze modele (różne warianty tego modelu w zależności od reprezentacji sieciowej przedstawiają N. Dayanand i R. Padman [1997, s. 906-918]). Zakładamy, że czynności nie mogą być rozdzielane.

Ograniczenia:

$$T_{s(k)} + d_k \leq T_{e(k)} \quad \text{dla } k = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$T_G \leq dd \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^M P_i = \text{const} = Z \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^M \delta_i = \text{const} = L \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^M P_i x_{it} \leq \beta \sum_{i=1}^M K_i x_{it} \quad \text{dla } t = 1, \dots, T_G \quad (10)$$

$$P_i - Z \delta_i \leq 0 \quad \text{dla } i = 1, \dots, M \quad (11)$$

$$T_i - t - 0,5 \leq dd(1 - x_{it}) \quad \text{dla } i = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T_G \quad (12)$$

$$T_i - t - 0,5 \geq -dd \cdot x_{it} \quad \text{dla } i = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T_G \quad (13)$$

$$P_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; T_1 \geq 0 \quad (14)$$

Funkcja celu:

$$\sum_{i=1}^M P_i e^{-\alpha T_i} - \sum_{i=1}^M K_i e^{-\alpha T_i} \rightarrow \max \quad (15)$$

- gdzie: T_i – termin zajścia i -tego zdarzenia (*zmienne decyzyjne*),
 P_i – wpływ związany z i -tym zdarzeniem (*zmienne decyzyjne*),
 K_i – koszt związany z i -tym zdarzeniem (nie rozważa się dla czynności osobno kosztów rozłożonych w czasie jej trwania – jako że zawsze można wyrazić koszt takiej czynności poprzez jego zdyskontowanie do momentu zakończenia czynności),
 N – liczba czynności,
 M – liczba zdarzeń (węzłów) ponumerowanych kolejnymi liczbami naturalnymi,

- d_k – czas trwania k -tej czynności,
 $s(k)$ – numer początkowego węzła (zdarzenia) k -tej czynności,
 $e(k)$ – numer końcowego węzła (zdarzenia) k -tej czynności,
 G – numer sztucznego zdarzenia w sieci przedsięwzięcia, następującego po wszystkich innych zdarzeniach,
 dd – najpóźniejszy czas, w jakim ma zostać zakończony projekt,
 L – ustalona liczba wpływów w projekcie,
 β – stosunek odzyskiwanych kosztów we wpływach przez podwykonawcę projektu (β jest ograniczona z góry przez wartość $1+p$, gdzie p to marża podwykonawcy, tym samym nie trzeba osobno wprowadzać do modelu marży wykonawcy),
 δ_i – zmienne binarne w zależności od tego, czy jest wpływ (większy od zera) związany z i -tym zdarzeniem (1 – jeśli tak),
 x_{it} – zmienna binarna w zależności od tego, czy i -te zdarzenie zaszło do końca t -tej jednostki czasu (1 – jeśli tak),
 Z – łączna kwota wpływów w przedsięwzięciu.

Przybliżone rozwiązanie przedstawionego problemu proponują N. Dayanand, R. Padman [2001]. Jest to metoda heurystyczna dwuetapowa, którą można przedstawić w następujących krokach:

- *Krok 1.* Za pomocą CPM wyznacz momenty nastąpienia zdarzeń w strategii pesymisty. Dla tak określonego harmonogramu ustal wpływy (ich wielkość i terminy) przy użyciu heurystyki symulowanego wyżarzania z funkcją $e^{ANPV/T}$ i określonym schematem chłodzenia, determinującym wartość T – maksymalizując wartość NPV.
- *Krok 2.* Dla optymalnego przydziału wpływów (wpływy związane i znane) z *kroku 1* zoptymalizuj ponownie harmonogram czynności (maksymalizując NPV), używając programowania liniowego (algorytm Russela i Grinolda).

Według przeprowadzonych testów powyższa heurystyka wyróżnia się dużo wyższą skutecznością w porównaniu z wszystkimi dotychczas stosowanymi metodami dla analizowanego modelu. Dla większych problemów jednak, choć jest techniką szybką, może znajdować rozwiązania dalekie od optymalnych (lokalne maksima NPV).

Autor chciałby w tym miejscu zaproponować własny algorytm podziału i ograniczeń, który wydaje się dość obiecujący. Został on zastosowany do przeanalizowania kilku małych deterministycznych problemów maksymalizowania NPV z niezwiązanymi i nieznanymi wpływami (projekty do dziesięciu czynności). Pomysł częściowo był zainspirowany opisanym wcześniej algorytmem podziału i ograniczeń w deterministycznych problemach maksymalizowania NPV z ograniczeniami zasobu odnawialnego [Icmeli, Erenguc 1993, s. 80-91].

- *Krok 1.* Warto zauważyć, że największa wartość NPV występować będzie przy liczbie wpływów równej liczbie czynności – gdy wpływy będą następować w węzłach bezpośrednio po zakończeniu każdej czynności. Załóżmy więc, że

liczba wpływów równa się liczbie czynności. Wtedy sprowadzamy zagadnienie do problemu maksymalizowania NPV w przedsięwzięciach ze znanymi i ustalonymi przepływami pieniężnymi bez ograniczeń zasobowych. Stosując wspomniany wcześniej algorytm Elmaghraby'ego i Herroelena [1990, s. 35-49], znajdujemy terminy zajścia wszystkich zdarzeń. Rozwiązanie stanowi pierwszy wierzchołek w drzewie poszukiwania, oznaczamy je jako UB_0 . Oznaczmy przez I_0 liczbę zdarzeń, gdzie występują wpływy. Jeśli $I_0 = L$, jest to rozwiązanie optymalne naszego problemu (L – ustalona liczba wpływów w przedsięwzięciu).

- *Krok 2.* Rozważamy możliwości przeniesienia wpływu po zakończeniu i -tej czynności do wpływu po zakończeniu j -tej czynności. Pokazano, że aby maksymalizować wartość NPV projektu, wpływ związany z i -tą czynnością powinien zostać skumulowany z wpływem czynności bezpośrednio po niej następującej bądź skumulowany z wpływem innej czynności nie występującej na ścieżce, do której należy analizowana i -ta czynność. Ponownie powstają problemy maksymalizowania wartości NPV w deterministycznym przedsięwzięciu ze związanymi i znanymi przepływami pieniężnymi, które rozwiązuje się wspomnianym wyżej algorytmem Elmaghraby'ego i Herroelena. Otrzymujemy wartości UB_i , które prowadzą do kolejnego rozgałęzienia drzewa poszukiwań.
- *Krok 3.* Analizujemy ten z końcowych węzłów drzewa poszukiwań, dla którego UB_i jest największe (bierzemy pod uwagę wszystkie dotychczasowe rozgałęzienia). Jeśli rozwiązanie dotyczące tego węzła generuje L wpływów, to jest ono rozwiązaniem optymalnym. W przeciwnym razie wracamy do *kroku 2*, dla wybranego UB_i (i łączymy wpływy kolejnych czynności).

Konieczne jest przeanalizowanie skuteczności tego algorytmu w odniesieniu do przedsięwzięć składających się z większej liczby czynności. W tym celu niezbędna jest implementacja komputerowa algorytmu; praca ta zostanie podjęta przez autora w najbliższym czasie.

Na zakończenie warto zwrócić uwagę na jeden aspekt dotyczący problemów harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją NPV, który dotychczas nie był poruszany. W pracy skupiono się na maksymalizacji NPV w przedsięwzięciach, ale tylko z punktu widzenia ponoszącego koszty projektu (najczęściej podwykonawcy). Przy takim podejściu zapomina się o podmiocie będącym właścicielem wpływów w przedsięwzięciu (najczęściej: właściciel, sponsor przedsięwzięcia). Korzyścią dla właściciela projektu jest możliwie najpóźniejsza płatność, zatem jego kryterium przy harmonogramowaniu projektu będzie minimalizacja wartości NPV wszystkich wpływów w przedsięwzięciu. Ten konflikt interesów odzwierciedla się naturalnie w procesie negocjacji co do warunków płatności. We wspomnianym konflikcie istnieją pewne konieczne cechy kooperacji, zarówno ze strony podwykonawcy (zależy mu na pokryciu kosztów i uzyskaniu zysku), jak i właściciela projektu (zależy mu na realizacji zleconego zadania – a więc szybkim ukończeniu projektu). Ciekawa byłaby ilustracja tej sytuacji w podejściu teorii-growym, ten temat jednak pozostaje otwarty.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono modele problemów harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją wartości NPV, przede wszystkim z uwzględnieniem przypadku niezwiązanych i nieznanych wpływów w przedsięwzięciu, zależnych od poniesionych kosztów. Autor, wychodząc od najprostszych modeli (Russela, Grinolda, Elmaghraby'ego, Dayananda i innych), opisał niektóre stosowane metody do znajdowania optymalnych-suboptymalnych rozwiązań. Wykorzystując częściowo idee w nich zawarte, przedstawił własny algorytm dla problemu maksymalizacji NPV w przedsięwzięciu z niezwiązanymi i nieznanymi wpływami. Daje on satysfakcjonujące wyniki przy harmonogramowaniu małych przedsięwzięć (kilka czynności), niezbędna jest jednak jego weryfikacja na przykładach przedsięwzięć wieloczynnościowych poprzez implementację komputerową algorytmu. Zarysowany został także stan pewnych badań w zakresie problemów harmonogramowania przedsięwzięć z maksymalizacją NPV i potrzeby praktyczne modelowania opisywanych zagadnień.

Literatura

- Dayanand N., Padman R., *A Two Stage Heuristic for Scheduling Payments in Projects*, „Annals of Operations Research” 2001 vol. 102 nr 1, s.197.
- Dayanand N., Padman R., *On Modeling Payments in Projects*, „Journal of the Operational Research Society” 1997 vol. 48, s. 906-918.
- Elmaghraby S.E., Herroelen W.S., *The Scheduling of Activities to Maximize the Net Present Value of Projects*, „European Journal of Operational Research” 1990 vol. 49, s. 35-49.
- Herroelen W.S., Van Dommelen P., Demeulemeester E.L., *Project Networks Models with Discounted Cash Flow a Guided Tour through Recent Developments*, „European Journal of Operational Research” 1997 vol. 100, s. 97-121.
- Icmeli O., Erenguc S.S., *A Branch and Bound Procedure for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flow*, „Management Science” 1996 vol. 42 nr 10, s. 1395.
- Icmeli O., Erenguc S.S., Zappe C.J., *Project Scheduling Problems: a Survey*, „International Journal of Operations and Production Management” 1993 vol. 13 nr 11, s. 80-91.
- Russel A.H., *Cash Flows in Networks*, „Management Science” 1970 vol. 16 nr 6, s. 357-373.
- Vanhoecke M., Demeulemeester E., Herroelen W., *On Maximizing the Net Present Value of a Project under Renewable Resource Constraints*, „Management Science” 2001 vol. 47 nr 8, s. 1113.
- Vanhoecke M., Demeulemeester E., Herroelen W.S., *Progress Payments in Project Scheduling Problems*, „European Journal of Operational Research” 2003 vol. 148, s. 604-620.

ON MAXIMIZING NET PRESENT VALUE IN PROJECT SCHEDULING

Summary

The author introduces project scheduling with maximizing the Net Present Value (NPV) as a problem with many applications among practitioners. There is a proposition of classification for scheduling problems with NPV maximization criterion. Subsequently the paper presents some models of described problems and applied solution methods. Payment scheduling problem (PSP) with negotiable payment terms is the core of the article. The author presents a promising algorithm for the problem, which must be implemented and tested versus currently used solution methods for PSP.