



Model oceny niepewności nakładów pracy na realizację procesów budowlanych

Dr hab. inż. Roman Marcinkowski, mgr inż. Artur Koper,
Politechnika Warszawska, Płock

1. Wprowadzenie

W budownictwie ustaliły się pewne formy analiz kosztowych i harmonogramowania przedsięwzięć. Bazują one na ocenie nakładów rzeczowych na wykonanie procesów budowlanych składających się na zrealizowanie przedsięwzięcia. Nakłady pracy zasobów czynnych (robotników, maszyn, zespołów itp.) liczone są w jednostkach czasu (robotniko-godzinach, maszyno-godzinach), a zużycie zasobów biernych (materiałów i wyrobów budowlanych) w jednostkach odpowiednich dla poszczególnych materiałów i wyrobów budowlanych. Nakłady pracy zasobów czynnych są funkcją ich wydajności w realizacji danego procesu budowlanego i stanowią podstawę do przewidywania czasu realizacji procesów budowlanych.

Należy zgodzić się z poglądem, że czas zrealizowania robót budowlanych może być różny z powodu zmienności warunków realizacyjnych, sprawności działania środków pracy (zasobów czynnych), ich dyspozycyjności itp. Normy nakładów pracy mają więc charakter zmiennych losowych, jak i wszystkie inne charakterystyki procesu budowlanego wyliczane na ich podstawie. Charakterystykami tymi są czas i koszt realizacji procesu budowlanego.

Koszt realizacji procesu budowlanego nie zależy tylko od nakładów pracy zasobów czynnych. Potrzebne do jego wykonania zasoby typu biernego stanowią główną część kosztów procesu. Trudność ich określenia wynika ze zmienności cen na rynku materiałów i wyrobów budowlanych.

Artykuł dotyczy problemu ustalania nakładów pracy na wykonanie procesów budowlanych – nakładów traktowanych jako zmienne losowe, wykorzystywane do oceny ryzyka czasu i kosztów w planowaniu przedsięwzięć. Problem rozwiązywany jest na bazie pomiarów czasu pracy w badaniach procesów budowlanych. Prezentowane w artykule modele analizy danych mają zastosowanie w harmonogramowaniu produkcji budowlanej przedsiębiorstw według metody przedstawionej w [1].

W celu usystematyzowania przedmiotu wykładu na przedstawiony temat, ustalmy że rozpatrywać będziemy proces budowlany P składający się z czynności p_i ($i=1, 2, \dots, n$) realizowanych sekwencyjnie w procesach. Proces może być powtarzany wielokrotnie w ramach zadania budowlanego Z . Dla procesu P określona jest jednostka obmiaru, a dla zadania jego zakres Z^P .

Zasoby czynne biorące udział w realizacji procesu i zadania tworzą zbiór S^{SR} , a zasoby bierne – zbiór S^M . Wyróżnianie tych dwóch typów zasobów jest niezbędne z punktu widzenia prowadzonych analiz i funkcji jakie spełniają one w realizacji procesów budowlanych. Zasoby czynne będziemy zamiennie nazywali *środkami pracy*.

2. Znaczenie nakładów pracy w planowaniu organizacji robót

Czas realizacji procesu budowlanego w planowaniu przedsięwzięć jest wielkością przewidywaną. Wykorzystujemy przy tym określone techniki analityczne i zbiory danych oraz doświadczenia z poprzednich realizacji rozpatrywanego procesu. Analizy mogą odbywać się na podstawie wydajności zaangażowanych środków pracy lub przez przyzmat norm nakładów pracy z uwzględnieniem liczby zaangażowanych w proces środków pracy.

Środki pracy uczestniczą w realizacji procesów budowlanych w określonych zestawach – zwanych tu zespołami realizacyjnymi. W zespole realizacyjnym wyróżnia się zasób wiodący i zasoby współpracujące. Zasadą jest, że zasób wiodący (zasoby wiodące – w sytuacji ich większej liczby) jest najbardziej obciążony pracą i jego wydajność decyduje o czasie wykonania procesu. Omówimy ten problem na przykładzie projektowania zestawów maszyn realizujących wspólnie pewne procesy budowlane – projektowania mechanizacji kompleksowej procesu budowlanego.

Współpracę maszyn w mechanizacji kompleksowej osiągamy w projektowaniu organizacyjnym poprzez:



- ustalenie liczby maszyn obsługujących maszynę wiodącą,
- zaprojektowanie schematu organizacyjnego współpracy maszyn,
- określenie niezawodności zestawu maszyn pracujących według określonego schematu organizacyjnego.

Wyjściowym zagadnieniem jest ustalenie liczby maszyn obsługujących maszynę wiodącą. Zagadnienie to dotyczy na przykład: ustalenia liczby środków transportowych obsługujących maszynę za- lub wyładowniczą lub zespół technologiczny, którym może być układacz masy betonowej w drogownictwie, zespół do układania masy betonowej w wykonawstwie konstrukcji monolitycznych itd.

Ustalenie liczby maszyn współpracujących odbywa się na podstawie porównania nakładów pracy (obciążenia pracą) poszczególnych rodzajów maszyn w realizacji procesu budowlanego. Jeżeli przyjmiamo, że nakład pracy maszyny wiodącej na zrealizowanie robót wynosi N_w godzin pracy, a maszyny współpracującej N_p godzin pracy, to liczba niezbędnych maszyn współpracujących I_p wyniesie:

$$I_p = \frac{I_w \cdot N_p}{N_w} \text{ lub } I_p = \frac{W_w \cdot I_w}{W_p} \quad (1)$$

gdzie: I_w określa liczbę maszyn wiodących zaangażowanych w wykonanie procesu; W_w , W_p są wydajnościami maszyn – odpowiednio – wiodącej i współpracującej.

Nakłady pracy maszyny są funkcją wydajności maszyny W i zakresu robót Z_r . Określa się je dla poszczególnych rodzajów maszyn wiodących N_w i współpracujących N_p według zależności:

$$N_w = \frac{Z_r^w}{W_w \cdot S_{w2}^w}, \quad N_p = \frac{Z_r^p}{W_p \cdot S_{w2}^p} \quad (2)$$

gdzie: S_{w2}^p , S_{w2}^w są współczynnikami wykorzystania czasu pracy maszyny – odpowiednio – współpracujących i wiodących.

Wydajność pojedynczej maszyny jest określona w charakterystyce maszyny, a dla maszyn transportowych, dla których wydajność zależy od odległości transportowych, można ją wyznaczyć z zależności:

$$W = \frac{q}{t_c} \cdot S_n \cdot S_{w1} \quad (3)$$

gdzie: t_c – czas trwania cyklu pracy środka transportowego, q – pojemność środka transportowego, S_n – współczynnik napełnienia środka transportowego (współczynnik wykorzystania pojemności środka transportowego), S_{w1} – współczynnik wykorzystania wydajności środków transportowych zależny od cha-

rakterystyki warunków realizacji procesu roboczego.

W wielu procesach budowlanych wykorzystywane są konstrukcje pomocnicze. Mają one charakter zasobów czynnych współpracujących (pomocniczych) z innymi zasobami typu czynnego. Nakład pracy takich konstrukcji kalkuluje się na podstawie nakładu pracy zespołu realizacyjnego wykorzystującego określony zestaw konstrukcji pomocniczej. W praktyce obliczenia prowadzi się według zależności:

$$N^p = \frac{\sum_{j \in R} r_j}{S_{w2}(\{R\}) \cdot I(\{R\})} \quad (4)$$

gdzie: R – zbiór procesów roboczych (robót) wykonywanych przy wykorzystaniu konstrukcji tymczasowej; r_j – pracochłonność (ilość roboczo-godzin) procesów roboczych $j \in R$; $S_{w2}(\{R\})$ – współczynnik wykorzystania czasu roboczego przez zespół realizujący zbiór robót R ; $I(\{R\})$ – teoretyczny skład zespołu roboczego realizującego roboty zbioru R .

Nakład ten odniesiony jest więc do określonego zestawu konstrukcji pomocniczej wykorzystywanego przez typowy (teoretyczny) skład zespołu realizującego zbiór procesów roboczych R . Sprawniejsze wykonanie zbioru procesów R wymaga zaangażowania kilku zestawów konstrukcji pomocniczych.

Mając określone nakłady pracy dla zasobów czynnych zaangażowanych w realizację procesu budowlanego o ustalonym zakresie (dla zadania), możemy ustalić czas wykonania zadania według wzoru:

$$T = \max_{k \in S^{RS}} \frac{N_k}{I_k} \quad (5)$$

gdzie: S^{RS} – zbiór zasobów czynnych zaangażowanych w realizację zadania; N_k – nakład pracy dla k -tego zasobu; I_k – liczba zaangażowanych zasobów k -tego rodzaju.

Nakłady czasu pracy są bardzo istotną charakterystyką w projektowaniu organizacji robót budowlanych. Pozwalają one na łączenie charakterystyk procesów, czynności, charakterystyki procesów złożonych – zadań – z ustaleniem ich pracochłonności w odniesieniu do zaangażowanych zasobów. Wydajności środków pracy mogą być różne w odniesieniu do wykonywanych w ramach zadania procesów, czynności. Stąd tak duży nacisk kładzie się w niniejszym artykule na ustalanie nakładów pracy.

3. Koszt realizacji zadania budowlanego

Koszt realizacji procesu budowlanego jest głównie funkcją nakładów rzeczowych (pracy zasobów czynnych i zużycia zasobów biernych) i kosztów jednost-



kowych. W zadaniach o określonym do realizacji zakresie procesu budowlanego mogą występować koszty dodatkowe niezależne od nakładów zasobów, które mają wartość stałą lub zmienną (związaną z czasem realizacji procesu). Kalkulację kosztu procesu budowlanego prowadzi się według zależności:

$$K = \sum_{i \in S^{RS}} N_i^{RS} \cdot c_i^{RS} + \sum_{j \in S^M} N_j^M \cdot c_j^M \quad (6)$$

gdzie: N_i^{RS} , N_j^M – nakłady zasobów czynnych i biernych
 c_i^{RS} , c_j^M – ceny jednostkowe pracy zasobów czynnych i zużycia zasobów biernych, S^{RS} , S^M – zbiory zasobów czynnych i biernych.

Ceny jednostkowe nakładów pracy wykonawca kalkuluje według swoich danych. Wynikają one z analizy systemu finansowania potencjału produkcyjnego przedsiębiorstwa (wynagradzania pracowników, utrzymywania środków trwałych itp.).

Ceny jednostkowe materiałów są cenami rynkowymi. Ich ustalenie wiąże się z przewidywaniem cen materiałów i wyrobów budowlanych w czasie realizowania robót. Nietrudno więc zauważyć, że w zależności (6) występuje ryzyko w oszacowaniu nakładów pracy (w pierwszym członie wzoru) i cen jednostkowych nakładów zasobów biernych (w drugim członie wzoru). Koszty stałe i zmienne przypisywane zadaniom wynikają z uwarunkowań realizacyjnych, mają indywidualizowany charakter i ich zasady kalkulowania nie mogą być zidentyfikowane w ogólnych rozważaniach, które prowadzimy w niniejszym artykule.

4. Znaczenie niepewności nakładów pracy dla oceny ryzyka czasu i kosztu zrealizowania planowanych robót budowlanych

Ryzyko w zarządzaniu projektami oznacza możliwość wystąpienia nieoczekiwanych okoliczności powodujących powstanie opóźnień w projekcie, braku możliwości realizacji części projektu lub wzrost kosztów realizacji. W odniesieniu do zadania i procesu budowlanego, ryzyko wiąże się z niepewnością czasu i kosztu ich realizacji oraz skutkami decyzji podjętych w tym zakresie. Ryzyko związane jest więc z decyzją. Nie rozstrzyga ono jednak o istocie problemu, który rozwiązujemy, charakteryzuje za to samą decyzję. Ma więc wymierny charakter i powinno być skwantyfikowane. Ryzyko jednak nie musi się „spełnić”.

Podstawowym zagadnieniem w ocenie ryzyka planu realizacji przedsięwzięcia jest probabilistyczna ocena czasu trwania i kosztu realizacji zadań oraz analiza wpływu tej oceny na spełnienie wymagań umownych (zakładanych). Ta druga kwestia jest mocno zindywidualizowana, stąd planiści najczęściej oceniają prawdopodobieństwa zrealizowania zbiorów zadań **w zakładanym czasie i budżecie oraz dotrzymania warunków umownych realizacji przedsięwzięcia**

budowlanego. Jest to ocena prawdopodobieństwa zdarzeń pozytywnych (wykonania w zakładanym czasie i budżecie). Prawdopodobieństwa zdarzeń niekorzystnych są dopełnieniem zdarzeń korzystnych, jednak ich koszty mogą być różne w zależności od zakresu niepowodzenia. Stąd wygodniej jest określić charakterystyki probabilistyczne spełnienia wymagań umownych. Jednak ocenę ryzyka czasu i kosztów realizacji analizowanego planu należy określić przez pryzmat spodziewanych strat z tytułu niedotrzymania tych wymagań. Ocenę tę proponuje się w [2] wyprowadzić z norm nakładów rzeczowych na wykonanie zadań z uwzględnieniem niepewności tych danych. Analiza ryzyka w planach realizacji przedsięwzięć przez pryzmat niepewności czasu i kosztów realizacji procesów budowlanych była przedmiotem publikacji [2]. Podstawowym problemem w implementacji przedstawionej tam teorii jest brak danych. Istnieje potrzeba identyfikacji i opisu zmienności norm nakładów rzeczowych i kosztów jednostkowych, awaryjności maszyn, absencji robotników, itp. Przyjmowanie tych danych wg własnego (eksperckiego) osądu jest zagrożone dużym błędem.

5. Badanie i normalizacja niepewności nakładów pracy

Badanie procesów pracy może być prowadzone w różnym celu. Jednym z nich jest normalizacja procesów pracy – ustalenie norm nakładów rzeczowych na ich wykonanie. W każdym przypadku badania procesu pracy powinien być realizowany cel ogólny – usprawnienie organizacji pracy. Powinniśmy bowiem ustalać charakterystyki ilościowe procesów budowlanych dla racjonalnych, efektywnych sposobów (standardów) ich wykonania. Metodę badania i normowania procesów pracy w budownictwie przedstawiono w [3]. Rozwiązania modelowe prezentowane w dalszej części artykułu wynikają z doświadczeń praktycznych – realizacji badań w wykonawstwie monolitycznych konstrukcji betonowych. Obserwowana na budowach organizacja pracy nie jest strukturalnie jednorodna, stąd wynikała potrzeba mierzenia czasu pracy środków realizacji w czynnościach i czasu realizacji zadań (kilku procesów pracy).

Proces podlegający normalizacji powinien być systemem względnie odosobnionym, zamkniętym pod względem rodzaju i zakresu robót oraz użytych w nim środków produkcji (zasobów czynnych i biernych). Do badań należy przyjmować taki proces w pojedynczym i mnogim zakresie (w zakresie najczęściej występującym na budowach). Obserwacja pojedynczego procesu pozwala ustalić wzajemną zależność wykonywanych czynności oraz zużycie czasu środków pracy na ich wykonanie. Obserwacja realizacji procesu na wielu frontach robót realizowanych częściowo równoległe, lub np. systemem potokowym,



pozwala uchwycić możliwości przemieszczania środków pracy w czasie realizacji zadania (realizowanego w celu lepszego wykorzystania czasu pracy zespołów specjalistycznych i maszyn) oraz określić zmienność zużycia czasu środków pracy.

Cykl badania pracy (danego procesu budowlanego) powinien być dwuetapowy. W każdym etapie wykonuje się w zasadzie te same obserwacje i pomiary. Etap I jest podstawą do opracowania racjonalnej technologii organizacji badanego procesu, zaś etap II, po wprowadzeniu do systemu realizacyjnego wypracowanych w etapie I usprawnień, jest podstawą normalizacji procesu. Ponieważ artykuł dotyczy ogólnych rozwiązań, etap I badań zostanie pominięty.

Obserwacje i pomiary procesu budowlanego prowadzone w celu jego normalizacji powinny identyfikować:

- czynności wykonywane w ramach procesu: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{p-1}, p_p, \dots, p_{p-1}, p_p\}$;
- środki pracy zaangażowane w realizację procesu P : $S^{RS} = \{s_1, s_2, \dots, s_{p-1}, s_p, \dots, s_m\}$;
- rodzaj i liczbę środków pracy, które wykonują czynności: $W = [w_{ij}]_{n \times m}$ (w_{ij} określa liczbę środków pracy j zaangażowanych w wykonanie czynności i);
- czas wykonania czynności: $T = [t_1, t_2, \dots, t_{p-1}, t_p]$

Zakładamy, że proces budowlany jest sekwencją czynności realizowanych szeregowo na jednym ustalonym froncie (miejscu). Dotyczy to więc takich

sytuacji, w których wykonanie procesu prowadzi do osiągnięcia określonego efektu. Niektóre procesy budowlane mają charakter cykliczny. Badanie takich procesów powinno identyfikować czynności cyklu w strukturze wielokrotnych powtórzeń.

Obserwacje procesu na wielu frontach robót lub wielokrotnych powtórzeń procesu cyklicznego ma na celu, obok ustalenia zmienności parametrów mierzonych dla pojedynczego procesu, ustalenie stopnia wykorzystania czasu pracy zasobów czynnych w realizacji wielokrotnie wykonywanych procesów w ramach jednego systemu organizacyjnego (zadania). Trzeba bowiem zdawać sobie sprawę z tego, że mimo właściwego doboru liczby środków wiodących i współpracujących do wykonania procesu, zaistnieją sytuacje, w których środek pracy będzie oczekiwał na zwolnienie frontu robót przez poprzednika lub gotowy do wykonania następczej czynności front robót będzie oczekiwał na wykonanie następczej czynności.

W obserwacji takich sytuacji należy zidentyfikować:

- zakresy $Z_p(k)$ procesu dla wyróżnionych stanów zaawansowania zadania – wyrażone w właściwej dla procesu jednostce miary;
- czasy $T_p(k)$ wykonania poszczególnych stanów zaawansowania zadania o zakresie $Z_p(k)$ – oraz,
- rodzaje i liczby środków pracy zaangażowane w realizację zadania: $W_p = [w_1^p, w_2^p, \dots, w_{p-1}^p, w_p^p]$.

Na bazie obserwacji czynności składających się na proces można określić teoretyczną normę nakładów pracy na wykonanie jednostki procesu P . Wyniesie ona dla poszczególnych zasobów $j \in S^{RS}$:

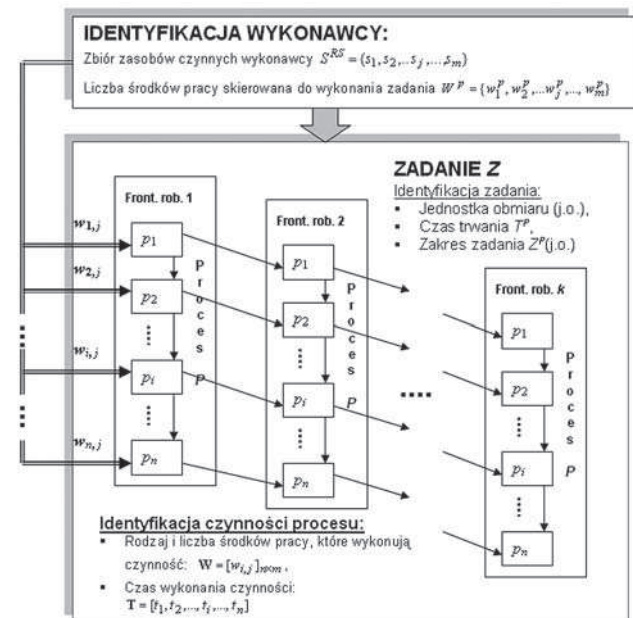
$$n_j^t = \sum_{i=1}^n w_{ij} \cdot t_i \quad (7)$$

Wielokrotne pomiary tych samych procesów i czynności dają możliwość uzyskania zbiorów danych identyfikujących zmienność mierzonych wielkości. W celu normowania procesu pracy należy więc przeprowadzić pomiary czasu realizacji czynności dla wszystkich procesów wykonywanych w ramach zadania. Pozwoli to na ustalenie statystyki teoretycznych nakładów pracy na proces budowlany i przyjęcie rozkładu prawdopodobieństwa tej zmiennej.

Wykorzystując pomiary czasu $T_p(k)$ wykonania poszczególnych stanów zaawansowania zadania o zakresie $Z_p(k)$ należy wyznaczyć współczynniki wykorzystania czasu pracy przez poszczególne zasoby w realizacji rozpatrywanego procesu P . Współczynniki te można obliczyć z zależności:

$$S_{w_2}^p(j, k) = \frac{\sum_{l=1}^k n_j^t(l)}{T_p(k) \cdot w_j^p} \quad \text{dla } k = 1, 2, \dots, Z_p(k) \quad (8)$$

W zależności tej w liczniku występuje teoretyczny nakład pracy na wykonanie zadania, zaś w mianowniku rzeczywisty (pomierzony) nakład pracy zasobów



Legenda: \longrightarrow – możliwe przejścia zasobów po procesach i frontach robót
 p_1, p_2, \dots, p_n – czynności

Rys. 1. Ideogram struktury modelu mierzenia pracy w normowaniu nakładów pracy na wykonanie procesu budowlanego



na wykonanie zadania. Teoretyczne nakłady są zawsze mniejsze od rzeczywistych. Obliczany zależnością (8) współczynnik jest więc zawsze mniejszy od jedności. Rzeczywiste jednostkowe nakłady pracy zasobów czynnych wynikają z pomiarów czasu wykonania zadań o różnym zakresie, wraz z identyfikacją zaangażowanych w nich zasobów. Wyznaczyć je możemy ze wzorów:

$$n_j^p(k) = \frac{T_p(k) \cdot w_j^p}{Z_p(k)} \quad \text{lub}$$

$$n_j^p(k) = \frac{\sum_{l=1}^k n_j^l(l)}{S_{w2}^p(j,k) \cdot Z_p(k)} \quad \text{dla } k=1,2,\dots,Z_p(k) \quad (9)$$

Jest to wartość charakteryzująca normy nakładów pracy zasobów w realizacji zadań o różnym zakresie. Niepewność jednostkowych nakładów pracy zasobów czynnych identyfikowana jest analizą statystyczną wartości zmiennych $n_j^l(k)$, $S_{w2}^p(j,k)$, $n_j^p(k)$ określanych dla $k=1, 2, \dots, Z_p$ obserwacji procesu budowlanego. Statystyka wartości tych zmiennych pozwala ustalić średnie i wariancje rozkładów zmiennych losowych oraz określić ich rozkłady prawdopodobieństwa [4].

Jeżeli uznamy (na podstawie wnioskowania statystycznego), że zmienne n_j^l , n_j^p podlegają rozkładowi normalnemu, to rzeczywiste nakłady pracy na wykonanie procesu budowlanego o określonym zakresie możemy wyznaczać wg wzorów przedstawionych w [2], [5]. W sytuacji, gdy takiego założenia nie możemy uczynić, należy wykorzystać symulacyjną metodę analizy

danych, polegającą na losowaniu wartości nakładów według funkcji rozkładu prawdopodobieństw zmiennych n_j^l , n_j^p i ustalaniu kolejnej statystyki – nakładów pracy na wykonanie planowanego zadania N_j^p – jako zmiennej losowej.

Podsumowując należy stwierdzić, że normy nakładów rzeczowych powinny mieć charakter zmiennych losowych. Dla praktyki wystarcza, aby te zmienne charakteryzować średnią i wariancją oraz rozkładem prawdopodobieństwa. Analizę ryzyka w planach realizacji przedsięwzięć, niepewności charakterystyk decyzyjnych w tych planach najłatwiej jest prowadzić metodami symulacyjnymi. Znajomość parametrów zmienności norm nakładów pracy pozwala określić prawdopodobieństwo zrealizowania robót budowlanych w zakładanym czasie, a w odniesieniu do kosztów – prawdopodobne koszty pracy, co było przedmiotem publikacji [2].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Marcinkowski R., Harmonogramowanie produkcji przedsiębiorstwa budowlanego, Przegląd Budowlany nr 2/2007, s. 41–47
- [2] Marcinkowski R., Koper A., Ocena ryzyka czasu i kosztów w planowaniu produkcji budowlanej, Przegląd Budowlany nr 7-8/2008, s. 70–75
- [3] Koper A., Marcinkowski R., Metodyka badania i normowania procesów pracy w budownictwie, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 91, Seria: Studia i Materiały Nr 20, Wrocław 2008, s. 237–245
- [4] Luszniwicz A., Słaby T., Statystyka z pakietem komputerowym STATISTICA PL. Teoria i zastosowania, Wyd. C. H. Beck, Warszawa 2003.
- [5] Milian Z., Wybrane metody oceny ryzyka niedotrzymania terminów realizacji budowy, Przegląd Budowlany nr 12/2005, s. 30–35

sukces
w branży
budowlanej
to sztuka
komplementarna



Info-Invest Sp. z o.o., 01-347 Warszawa
ul. Gabriela 4, lok.1, tel.: 022 664 44 44
e-mail: redakcja@infoinvest.pl

www.infoinvest.pl
www.pracowniaeventow.pl

