TECHNIKA TRANSPORTU SZYNOWEGO

Michał KRZEMIŃSKI

KRYTERIA I MODELE SZEREGOWANIA ZADAŃ W BUDOWNICTWIE

Streszczenie

W artykule omówiona została charakterystyka procesów budowlanych wraz z odniesieniem do systemów gniazdowych i przepływowych. Przedstawiono podstawowe modele szeregowania zadań stosowane w przygotowaniu wykonawczych harmonogramów budowlanych. Przedstawiony został zbiór kryteriów w nich wykorzystywanych. Dodatkowo opracowany został zbiór kryteriów ściśle dedykowanych dla potrzeb budownictwa.

WSTĘP

Opracowanie harmonogramów budowlanych jest jednym z podstawowych elementów, w procesie przygotowania fazy realizacyjnej procesu inwestycyjnego. Wykonane harmonogramy powinny pozwolić na zachowanie terminów dyrektywnych, wynikających z umów na roboty budowlane. Powinny pozwalać na pełne wykorzystanie mocy produkcyjnej wykonawcy, wykorzystując na przykład maksymalną wydajność zasobów roboczych, uzyskiwaną dzięki zapewnieniu ciągłości pracy. Harmonogram powinien być opracowany w taki sposób, aby umożliwiał wykonanie wszelkich prac w możliwie najkrótszym terminie. Organizacja budowy natomiast powinna być realizowana w taki sposób, aby nie powstawały dodatkowe koszty wynikające ze złego uszeregowania procesów. Duże pole manewrów w harmonogramowaniu robót budowlanych występuję w przypadku wykonywania tego samego typu prac, na szeregu działek roboczych. Dla przygotowania tego typu harmonogramów można posłużyć się modelami szeregowania zadań stosowanymi w produkcji przemysłowej. W artykule, przedstawiono wybrane nowoczesne metody szeregowania zadań produkcyjnych, realizowanych w systemach gniazdowych (Jobshop) i w systemach przepływowych (Flowshop). Określono także zbiór kryteriów szeregowania zadań w harmonogramach produkcji budowlanej.

1. RODZAJE PROCESÓW BUDOWLANYCH

Stosując metodę pracy równomiernej, podziału można dokonać na trzy podstawowe grupy: *procesy jednego typu, procesy jednorodne i procesy niejednorodne*. Procesy jednego typu charakteryzują się wykonywaniem prac na określonej ilości działek o takiej samej powierzchni i technologii wykonywania prac. Procesy jednorodne to te w których technologia pozostaje niezmienna, zmienia się natomiast wielkość działek. Proporcjonalna jest pracochłonność i wielkość działki. Procesy niejednorodne to takie w których nie występuje

żadna stała zależność pomiędzy wielkością działki a pracochłonnością, niezmienna pozostaje jedynie technologia wykonywania robót. [5]

2. SYSTEMY GNIAZDOWE I PRZEPŁYWOWE

W modelach przepływowych (ang. Flowshop, FS) na każdej działce roboczej praca powinna zostać wykonana przez określone brygady w określonej kolejności. Zakłada się również że daana wyspecjalizowana brygada wykonuje pracę tylko raz na kolejnej działce. W modelach gniazdowych (ang. jobshop, JS) nie występuje wymóg kolejnościowy wykonywania prac. Brygady mogą również wykonywać kilkakrotnie pracę na tych samych działkach. Ważne jest to że w obu modelach w danym czasie prace na działkach mogą być wykonywane przez jedną brygadę.[1] Najczęściej stosowane kryteria optymalizacyjne to: [8]

- sumaryczne / ilościowe opóźnienie (ang. Tardiness),
- średni czas przebywania zadania w systemie (ang. Flowtime),
- czas wykonania wszystkich zadań (ang. Makespan).

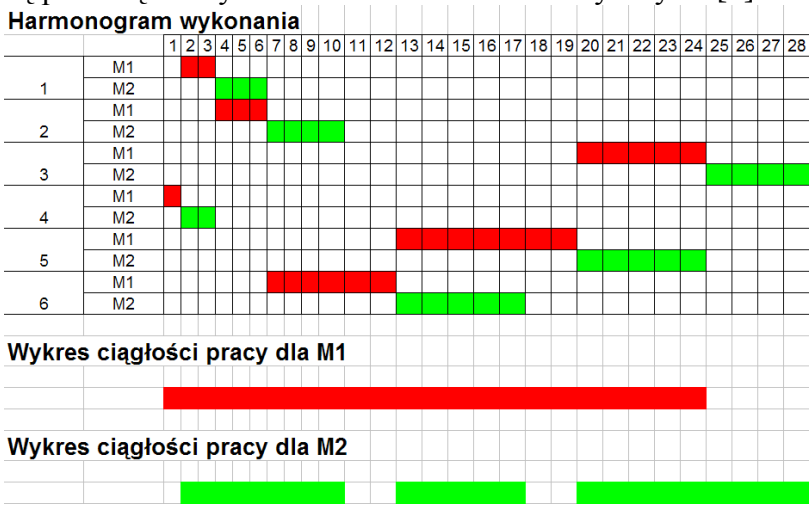
W modelach przepływowych Można stwierdzić że oba systemy produkcji znajdują swoje zastosowanie w budownictwie. System przepływowy pasuje bardziej do produkcji w warunkach budowy, system gniazdowy do wytwarzania materiałów budowlanych. W tym rozdziale pracy statutowej chciano bardziej pokazać możliwości stosowania zaawansowanych technik szeregowania zadań dla potrzeb opracowywania harmonogramów budowlanych. W związku z powyższym w dalszej części pracy nacisk zostanie położony na modele produkcji przepływowej.

3. MODELE SZEREGOWANIA ZADAŃ

3.1. Modele szeregowania zadań dla budownictwa uwzględniające jedynie kryterium czasowe

3.1.1. Algorytm Johnsona

Algorytm ten dotyczy zagadnienia harmonogramowania pracy dwóch maszyn na „n" działkach roboczych (obiektach). Został sformułowany (1954r.) przy założeniu, że harmonogramowanie jest wieloetapowym procesem planowania. Algorytm Johnsona charakteryzuje się prostotą i małym zakresem obliczeń numerycznych. [5]



Rys. 1. Wynik zastosowania algorytmu Johnsona

Źródło: opracowanie własne

3.1.2. Algorytm CDS

Nazwa algorytmu pochodzi od pierwszych liter nazwisk twórców, Herbert Campbell, Richard Dudek, Milton Smith (1970r.). Algorytm jest uogólnieniem algorytmu Johnsona, pozwalającym na optymalizację dla więcej niż dwóch maszyn. Zasada działania algorytmu polega na podzieleniu zadania z więcej niż dwoma maszynami na kilka zadań z dwoma maszynami, podzadania optymalizowane są przy użyciu algorytmu Johnsona. Następnie wybiera się taki układ zadań który da najmniejszy czas całkowity.

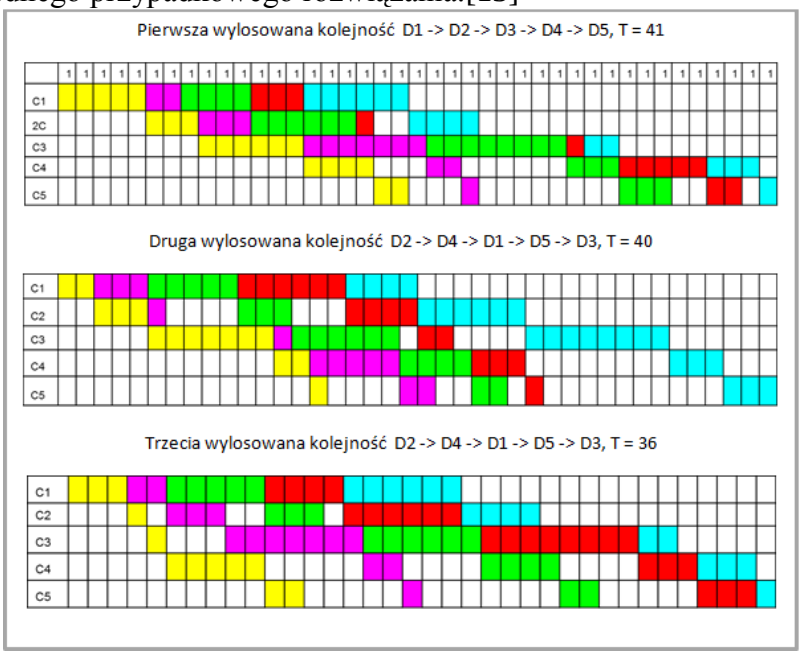
3.1.3. Algorytm NEH

Nazwa algorytmu pochodzi od pierwszych liter nazwisk twórców, Muhammad Nawaz, Emory Enscore, Inyong Ham (1983r.). Zasadą działania modelu jest nadawanie zadaniom o większym sumarycznym czasie trwania wyższego priorytetu. Poniżej znajduje się opis kolejnych kroków algorytmu:

1. Sortujemy zadania zgodnie z malejącym (nierosnącym) sumarycznym czasem obróbki na wszystkich maszynach,
2. Ustawiamy dwa pierwsze zadania w kolejności umożliwiającej uzyskanie krótszego czasu zakończenia Cmax(dwie możliwości),
3. Dla k= 3, … , N wykonujemy krok 4,
4. Wstawiamy k-te zadanie do sekwencji w miejsce, gwarantujące najmniejszy przyrost czasu Cmax(k możliwości),
5. Uzyskana sekwencja traktowana jest jako wynik działania algorytmu.

3.1.4. Algorytm symulacyjny

Algorytm symulacyjny możemy stasować przy dowolnej liczbie maszyn, jednak nie zapewnia on znalezienia rozwiązania optymalnego, lecz jedynie suboptymalnego. Polega on na losowaniu kolejności realizacji działek na podstawie generatora liczb losowych i obliczaniu łącznego czasu trwania robót T dla założonego wariantu. Przy odpowiedniej liczbie prób najlepszy wynik powinien zbliżyć się do rozwiązania optymalnego, a na pewno być lepszy od jednego przypadkowego rozwiązania.[13]



Rys. 2. Wynik zastosowania algorytmu symulacyjnego – 3 interacje.

Źródło: opracowanie własne

3.1.5. Algorytm Łomnickiego i Browna - Łomnickiego

Algorytmy wykorzystujące metodę podziałów i ograniczeń. Algorytm Łomnickiego opracowany został w celu ustalenia kolejności obróbki detali na maszynach. Możliwe jest również zaadoptowanie go do warunków budowlanych, do wyznaczania kolejności pracy m maszyn na n działkach. Algorytm Browna Łomnickiego będący uogólnieniem metody Łomnickiego różni się jedynie postacią funkcji ograniczającej zbiór permutacji. [5]

3.2. Modele szeregowania zadań stosowane w produkcji przemysłowej

3.2.1. SPT (shortest processing time)

Jest to model oparty o zasadę najkrótszego czasu przetwarzania. Algorytm służący do wyznaczania kolejności zadań przy której całkowity czas trwania procesu będzie najkrótszy. Zasadą algorytmu, jest umiejscawianie na początku działek na których czas wykonywania czynności jest najkrótszy. Dotyczy to sumarycznego czasu wykonania prac na działce przez wszystkie kolejne maszyny. Jeżeli występuje kilka działek dla których sumaryczny czas wykonywania wszystkich czynności jest sobie równy algorytm umiejscawia na pierwszym miejscu działki posiadające krótsze czasy w czynnościach początkowych. Algorytm nadaje się do stosowania w optymalizacji procesów niejednorodnych przy zastosowaniu modelu flowshop. Poniżej znajduje się prosty przykład działania modelu. W tabeli 1. przedstawiono czasy wykonywania prac na poszczególnych działkach.[10], [11]

Tab.1. Przykładowe czasy wykonania robót dla modelu SPT **Źródło:** opracowanie własne

	Działka I	**Działka II**	**Działka III**	**Działka IV**
Czynność A	1	7	2	2
Czynność B	1	1	2	2
Czynność C	8	1	4	6

Na rysunku 3. przedstawiono zrzut z ekranu przy użyciu narzędzia LEKIN przedstawiający optymalne uszeregowanie zadań z zastosowaniem reguły SPT.

Rys. 3. Przykładowe uszeregowanie zadań w modelu SPT.

Źródło: opracowanie własne

Najkrótszy sumaryczny czas wykonywania wszystkich prac posada działka III równy 8 jednostek i została zlokalizowana jako pierwsza, drugi czas realizacji posiada działka II równy 9 dlatego została umiejscowiona jako druga. Działki I i IV posiadają taki sam łączny czas realizacji równy 10 jednostek. Pierwsza została umiejscowiona jednak działka I ponieważ posiada ona krótszy czas realizacji pierwszej czynności.

Model SPT pozwala na uszeregowanie zadań dla nieograniczonej ilości maszyn pracujących na nieograniczonej ilości działek. Jego wadą jest to, że głównym kryterium

szeregowania zadań jest kryterium całkowitego czasu realizacji wszystkich prac na wszystkich działkach.

3.2.2. LPT (longest processing time)

Jest to model oparty o zasadę najdłuższego czasu przetwarzania. Algorytm służący do wyznaczania kolejności zadań przy której całkowity czas trwania procesu będzie najkrótszy. Zasadą algorytmu, jest umiejscawianie na początku działek na których czas wykonywania czynności jest najdłuższy. Dotyczy to sumarycznego czasu wykonania prac na działce przez wszystkie kolejne maszyny. Jeżeli występuje kilka działek dla których sumaryczny czas wykonywania wszystkich czynności jest sobie równy algorytm umiejscawia na pierwszym miejscu działki posiadające krótsze czasy w czynnościach początkowych. Algorytm nadaje się do stosowania w optymalizacji procesów niejednorodnych przy zastosowaniu modelu flowshop. Poniżej znajduje się prosty przykład działania modelu. W tabeli 1. znajdującej się powyżej przedstawiono czasy wykonywania prac na poszczególnych działkach. Na rysunku 4. przedstawiono zrzut z ekranu przy użyciu narzędzia LEKIN przedstawiający optymalne uszeregowanie zadań z zastosowaniem reguły LPT. [10], [11]

Rys. 4. Przykładowe uszeregowanie zadań w modelu LPT.

Źródło: opracowanie własne

W uszeregowaniu zadań zastosowanie modelu LPT widzimy że jako pierwsze dwie działki umiejscowione zostały te z numerem I i IV, nadal jako pierwsza realizowana jest działka I gdyż posiada krótszy czas realizacji czynności początkowej. Kolejna w harmonogramie znalazła się działka II z czasem realizacji równym 9 jednostek, na końcu przewidziana została działka III z najkrótszym łącznym czasem realizacji czynności.

Model LPT pozwala na uszeregowanie zadań dla nieograniczonej ilości maszyn pracujących na nieograniczonej ilości działek. Jego wadą jest to, że głównym kryterium szeregowania zadań jest kryterium całkowitego czasu realizacji wszystkich prac na wszystkich działkach. Warto zauważyć duże podobieństwo w działaniu do algorytmu NEH.

3.2.3. WSPT (weighted shortest processing time)

Model działa na zasadzie wcześniej opisanego modelu SPT. Na etapie wprowadzania danych każdej kolejno definiowanej działce roboczej dopisujemy wagę. Algorytm wykonując szeregowanie zadań będzie ją uwzględniał przesuwając na początek działki o najwyższej wadze. Przy założeniu że t_i oznacza czas trwania procesu a w_i przypisaną danej działce wagę, działanie modelu opisuje poniższa zależność:

$$t_1/w_1 <= t_2/w_2 <= \ldots <= t_n/w_n, \text{ gdzie } i = 1,2,\ldots,n. \quad (1)$$

Jeżeli wprowadzimy na przykład pięć działek o wadze 0,15 i pięć działek o wadze 0,05 to najpierw prace prowadzone będą na działkach o wyższej wadze. Działki zostaną uszeregowane zgodnie z algorytmem SPT. Następnie prace prowadzone będą na kolejnych pięciu działkach o mniejszej ważności, na których również szeregowanie zostanie przeprowadzone zgodnie z zasadami modelu SPT. Jeżeli mamy działki, na których czasy trwania są sobie równe możemy w ten sposób wprowadzić kolejność jaka byłaby najkorzystniejsza ze względu, na przykład, na odległość pomiędzy działkami. [10], [2],

3.2.4. EDD (earliest due date)

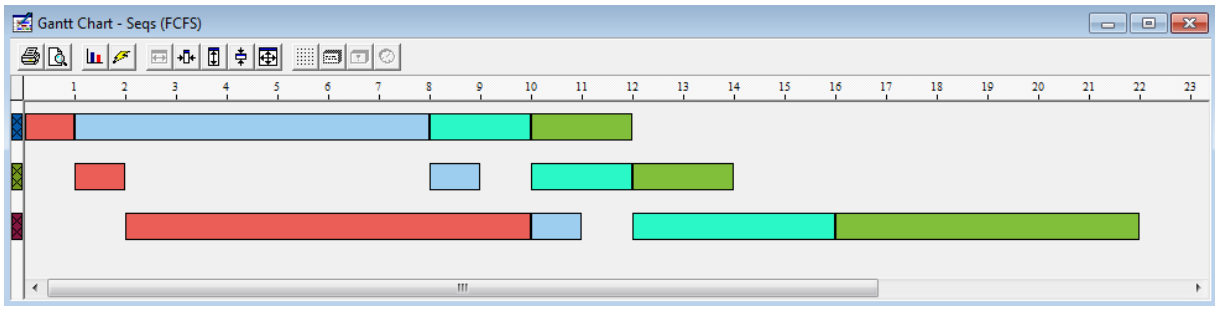
Model zakłada kolejność wykonania zadań według terminów zamknięcia zleceń, czyli ich zadanych czasów zakończenia (ang. earliest due date). Algorytm działa licząc sumę czasów począwszy od przybycia zlecenia do systemu aż do zakończenia danego zlecenia następnie wybieramy zlecenie z mniejszą sumą. Przyjmując że d_i oznaczać będzie ostateczny termin zakończenia zadania, działanie modelu przedstawia poniższa zależność:

$$d_i <= d_{i+1} <= \ldots <= d_n, \text{ gdzie } i = 1,2,\ldots,n. \quad (2)$$

Wyniki działania modelu nierzadko będą zbliżone do wyników jakie uzyskuje się z zastosowania modelu SPT, jest to powodowane faktem że najkrócej w systemie znajdują się działki na których zaplanowano najkrótszy czas wykonywania prac. [14],

3.2.5. FCFS (first come first serve)

Model charakteryzuje się brakiem jakiegokolwiek skomplikowania. Polega na uszeregowaniu zadań zgodnie z kolejnością wprowadzania danych. Model jest prosty, jednakże dla budownictwa może mieć duże znaczenie. Planując budowę wydzielamy poszczególne fronty robót na których mamy podział na działki. Każdy planista ma swoją wizję organizacji budowy. Dzięki zastosowaniu modelu może sprawdzić jaki czas uzyskałby przy organizacji pracy w najbardziej intuicyjny dla niego sposób. Uszeregowanie może być również wynikową technologii prowadzenia robót, kosztów przemieszczania się kolejnych brygad pomiędzy działkami, może też zależeć od innych czynników wpływających na pracę na budowie. Na poniższym rysunku znajduje się wynik szeregowania przy zastosowaniu reguły FCFS.



Rys. 5. Uszeregowanie zadań w modelu FCFS.

Źródło: opracowanie własne

Uzyskany wynik pokazuje że przy takich danych wejściowych, wynik jego działania, jest jedynie o 1 jednostkę czasową dłuższy, od wyników uzyskanych metodą LPT i MS. Przy długości horyzontu liczącego 21 dni jest to oszczędność w granicach 5%. Jak opisano wcześniej może się okazać że zastosowanie reguły MS, może nie być bardziej korzystne. Uzyskując niewielkie skrócenie czasu sumarycznego, dostajemy zupełnie inną kolejność, która może okazać się droższa i bardziej kłopotliwa w koordynacji.

3.2.6. MS (minimum slack)

Zadaniem modelu jest takie uszeregowanie zadań które daje możliwie najmniejsze przestoje w pracy brygad. Przyjmijmy że d_i to termin zakończenia zadania, natomiast t_i to czas trwania zadania. Zależność opisująca działanie modelu została przedstawiona poniżej:

$$d_i-t_i <= d_{i+1}-t_{i+1} <= \ldots <= d_n-t_n, \text{ gdzie } i = 1,2,\ldots,n. \quad (3)$$

Na rysunku znajdującym się poniżej widać efekt działania modelu dla danych z rozdziału opisującego model SPT.

Rys. 5. Uszeregowanie zadań w modelu MS.

Źródło: opracowanie własne

W uszeregowaniu widać że dzięki algorytmowi MS uzyskano ciągłość pracy brygady pierwszej i trzeciej. Poszarpana natomiast jest praca brygady drugiej. Nie mamy ciągłości pracy na działkach, występują nawet dziesięciodniowe przestoje.[10], [11],

4. KRYTERIA OPTYMALIZACJI

4.1. Podstawowe kryteria optymalizacji w szeregowaniu zadań

Do podstawowych kryteriów szeregowania zadań zaliczamy: [2], [12]

- moment zakończenia (ang. completion time),
- długość uszeregowania C_{max},
- czas przepływu przez system (ang. flow time),
- średni czas przepływu przez system,
- opóźnienie (ang. lateness),
- spóźnienie (ang. tardiness),
- maksymalne opóźnienie L_{max},
- maksymalne spóźnienie T_{max},
- znacznik spóźnienia - odpowiada na pytanie: Czy zadanie się spóźniło?
- liczba spóźnionych zadań.

Kryteria harmonogramowania w systemie KbRS (Knowledge based Rescheduling System). W kryteriach KbRS uwzględniono dodatkowo element kosztowy. Kryteria wymienione zostały na poniższej liście. [6], [3]

- Kryterium minimalnego C_{max} (minimalnej długości uszeregowania zbioru zadań),
- Kryterium minimalnego C_{sr} (minimalnej średniej długości uszeregowania),
- Kryterium minimalnego F_{max} (maksymalnego czas przepływu),
- Kryterium minimalnego F_{sr} (średniego czas przepływu),
- Kryterium minimalnej L_{max} (maksymalnej nieterminowości),
- Kryterium minimalnej L_{sr} (średniej nieterminowości),

- Kryterium minimalnego T_{max} (maksymalnego opóźnienia),
- Kryterium minimalnego T_{sr} (średniego opóźnienia),
- Kryterium minimalnego E_{max} (maksymalnego wyprzedzenia),
- Kryterium minimalnego E_{sr} (średniego wyprzedzenia),
- Kryterium minimalnej U (kary za przekroczenie terminów).
- Kryterium minimalnego kosztu całkowitego K_{Sum} zbioru zleceń.
- Kryterium minimalnego kosztu nieterminowości K_{Lat} zbioru zleceń.
- Kryterium minimalnego kosztu opóźnień K_{Tar} zbioru zleceń.
- Kryterium minimalnego kosztu wyprzedzeń K_{Ear} zbioru zleceń.

4.2. Kryteria szeregowania zadań dla harmonogramowania budowlanego

W rozdziale podjęto próbę opracowania i opisania zbioru kryteriów będących bazą dla opracowywanego modelu przeglądu zupełnego szeregowania zadań. [9], [4] Kryteria opracowane w rozdziale stanowią częściową kompilację tych wymienionych wcześniej.

- **Najkrótszy czas realizacji** – rozumiany jako najmniejsza długość uszeregowania. Kryterium często pojawiające się w zadaniach optymalizacyjnych z zakresu szeregowania zadań. Dla budownictwa szczególnie istotne, ponieważ pozwala na określenie terminu wykonania wszystkich prac. Wydaje się być zasadnym wprowadzenie tego kryterium w dwojakiej postaci. Po pierwsze klasycznej, dotyczącej wykonania wszystkich czynności na wszystkich działkach roboczych. Po drugie dedykowanej dla budownictwa, dotyczącej wykonania określonej liczby czynności (licząc od początku) z całego cyklu produkcyjnego na wszystkich działkach roboczych. Podział taki jest proponowany ze względu na zmienność branży w budownictwie, która nierzadko łączy się ze zmianami podwykonawców dla danych robót. Zmiana podwykonawcy nierzadko wymusza konieczność przekazania placu budowy. Przekazanie placu budowy może wymagać zakończenia prac przez brygady poprzednie. W przypadku kiedy działki posiadają wspólny ciąg komunikacyjny przekazaniu mogą podlegać nie tylko działki, ale cały front robót. W przypadku zastosowania tego kryterium uszeregowanie z najmniejszą wartością całkowitego czasu prowadzenia robót zostanie wybrane jako najlepsze. Założenie to tyczy się zarówno opcji całościowej, jak i opcji dla wybranego ciągu czynności.
- **Ciągłość pracy brygad** - jedno z najważniejszych kryteriów stosowanych w budownictwie w procesie szeregowania zadań. Każdemu właścicielowi firmy zależy na posiadaniu dobrze wykwalifikowanego i zgranego zespołu. Jednym z elementów które pozwalają osiągnąć ten cel jest zapewnienie wynagrodzeń na odpowiednim poziomie dla swoich pracowników. Wynagrodzenia płyną natomiast między innymi z przerobu wypracowanego przez brygadę roboczą. Można stwierdzić że, żeby posiadać dobrą kadrę należy zapewnić jej jak największą ciągłość w pracy. Ciągłość pracy pozwala również na prostsze wypracowanie zgrania w zespole. W budownictwie pracowników dzielimy na dwie grupy, pracowników posiadających specjalizację i robotników pomocniczych. Jeżeli chodzi o tych drugich można dawać im różne zadania, co pozwala na zapewnienie im ciągłości pracy w prosty sposób. W grupie pierwszej znajdują się natomiast robotnicy o którzy największą wydajność uzyskują wykonując pracę w swojej specjalności, dodatkowo mogą niechętnie chcieć wykonywać pracę w innych specjalnościach ponieważ nie w każdej są w stanie sprostać wymogom jakościowym jakie są im stawiane i jakie oni sami sobie stawiają. Powyższe rozważania pokazują że, kryterium jest ważne dla budownictwa. Również w tym przypadku rozsądnym wydaje się dokonać pewnego uszczegółowienia.

Podstawowo można założyć że warunkiem decydującym będzie minimalny czas przestojów wszystkich brygad. Proponuje się również możliwość stosowania opisywanego kryterium do jednej lub kilku wybranych brygad. Takie założenie jest szczególnie istotne w przypadku zatrudniania podwykonawców do danych czynności. Płacąc za usługę zewnętrzną, warto jest płacić za rzeczywistą pracę a nie za przestoje. W przypadku zastosowania tego kryterium uszeregowanie z najmniejszą wartością całkowitego czasu przestoju brygad zostanie wybrane jako najlepsze. Założenie to tyczy się zarówno opcji całościowej, jak i dla opcji wybranej jednej lub kilku czynności.

- **Nieprzekraczalność terminów** – kolejne kryterium lecz nie mniej ważne niż poprzednie. Jednym z podstawowych elementów umowy na wykonanie robót budowlanych, jest określenie terminu realizacji robót. Jest to termin ostateczny, przekroczenia mogą nieść za sobą konieczność ponoszenia kar umownych. Zastosowanie kryterium dla całego procesu realizacji, ma na celu znalezienie takiego uszeregowania robót, które pozwoli na nieprzekroczenie terminu dyrektywnego. Jeżeli natomiast okaże się, że nie istnieje takie ustawienie kolejności działek roboczych, które daje taką możliwość zastosowanie kryterium pozwoli na wybranie rozwiązania dającego możliwie najmniejsze opóźnienie względem założonego. Kryterium może być stosowane jako termin dyrektywny całej inwestycji, jak również jako termin nie przekraczalny zakończenia prac na wybranej działce roboczej. W takim przypadku, na etapie wprowadzania danych do zadania optymalizacyjnego, należy podać nie tylko termin dyrektywny całego procesu, ale także terminy dla poszczególnych działek. Można je przypisać wszystkim bądź tylko wybranym działkom roboczym. Jest to ważne kryterium, ponieważ w budownictwie często występują działki strategiczne dla prowadzenia robót na całym obiekcie, chodzi tu na przykład o działki, na których będą dalej prowadzone prace, lub w których będą się znajdować ważne elementy instalacji. Kryterium można również zastosować tak aby nieprzekraczalny termin dotyczył wykonania prac przez wybraną brygadę roboczą. Nie jesteśmy tu w stanie skrócić czasu jaki jest niezbędny, a wynikający z ilości prac i wybranej technologii prowadzenia robót. Możemy natomiast określać termin końcowy. W pewien sposób następuje tutaj połączenie z kryterium ciągłości pracy brygady, jednakże to kryterium pozwala na wybór terminu w sposób dowolny. W przypadku zastosowania tego kryterium uszeregowanie z nieprzekroczonym terminem dyrektywnym zostanie wybrane jako najlepsze. Jeżeli wystąpi natomiast kilka możliwych rozwiązań, należy wybrać to, które pozwoli na uzyskanie największego zysku czasowego. Można również wybrać takie które zapewnia możliwie największą ciągłość pracy brygad. Założenie to tyczy się zarówno opcji całościowej, jak i dla opcji wybranej jednej lub kilku czynności lub brygad roboczych.
- **Minimalizacja kosztów przenoszenia frontu robót** – jest to ostatnie kryterium jakie zostało wybrane w niniejszej pracy. Koszt w tym przypadku należy rozumieć nie tylko jako nakład finansowy ale jako nakład wszelkiego rodzaju środków. Czasy wykonania robót na poszczególnych działkach mogą być niekiedy bardzo różne od siebie. W takim przypadku model szeregowania zadań, mógłby podać kolejność optymalną pod względem wcześniej podanych kryteriów, takich jak na przykład ciągłość pracy brygad. Uszeregowanie takie mogłoby być jednak nacechowane brakiem płynności przechodzenia brygad w planie placu budowy. Wyobraźmy sobie przypadek w którym działki robocze są mieszkaniami do wykończenia i znajdują się w obrębie dwóch klatek schodowych, przenoszenie brygad roboczych pomiędzy klatkami i piętrami mogłoby generować koszty i powodować zamieszanie. Należy zwrócić uwagę na to, że odróżnieniu do produkcji przemysłowej obiekty produkcji

budowlanej mają określone położenie i nie można go zmieniać na potrzeby optymalizacji procesu wykonawczego. Jest to ważna uwaga, ponieważ modele szeregowania zadań powstają i są parametryzowane głównie na potrzeby produkcji fabrycznej. Zadaniem kryterium jest wpływanie na uszeregowanie zadań w taki sposób aby łączny koszt przenoszenia frontów robót był najmniejszy. Należy w tym celu na etapie wprowadzania danych dla zadania utworzyć szereg matryc kosztów dla przenoszenia poszczególnych brygad pomiędzy poszczególnymi frontami robót. Matryce nie muszą być symetryczne. Jeżeli natomiast przenoszenie brygady nie stanowi żadnego problemu, można dla niej nie wprowadzać macierzy przejścia Zdaniem autora kryterium należy stosować jako kryterium uzupełniające [7] lub kryterium o mniejszej wadze. Specyfika branży budowlanej jest taka że wymienione wcześniej kryteria wydają się być znacznie ważniejsze. W przypadku zastosowania tego kryterium uszeregowanie z najmniejszym kosztem przejścia brygad zostanie wybrane jako najlepsze. Założenie to tyczy się zarówno opcji całościowej, jak i dla opcji wybranej jednej lub kilku czynności.

Wśród opracowanych kryteriów nie zostały wprowadzone kryteria czysto kosztowe. Zdecydowano się na takie rozwiązanie, ponieważ każde z czterech wybranych kryteriów zawiera w sobie element kosztów. Krótki czas realizacji to możliwość zaangażowania zasobów do innego zadania, ciągłość pracy brygad to większe wykorzystanie zasobów pracujących, nieprzekraczalność terminów pozwala na uniknięcie zakłóceń i kar. Ostatnie kryterium najbliższe jest kryterium kosztowemu, możliwe jest jednak wprowadzanie nakładów w innej postaci niż finansowa, nie mniej jednak minimalizacja nakładów innych w większości przypadków prowadzi do minimalizacji kosztów.

W przypadku stosowania kilku kryteriów zdaniem autora można by zastosować system wagowy. Suma wag dla poszczególnego przypadku jak wiadomo powinna dać jeden. Jeżeli chodzi natomiast o dokładne ustalenie ich wartości można jedynie powiedzieć, że będą one zależne od celu jaki chcemy osiągnąć w wyniku optymalizacji.

PODSUMOWANIE

Podsumowując podrozdział 3.1. Modele szeregowania zadań dla budownictwa uwzględniające jedynie kryterium czasowe chciano zwrócić szczególną uwagę na kilka podstawowych wad wymienionych powyżej algorytmów szeregowania zadań. Pierwsza jest taka że uwzględniają one jedynie kryterium najkrótszego czasu realizacji całego procesu, nie pozwalają na uwzględnienie takich kryteriów jak chociażby kryterium ciągłości pracy brygad. Druga wada to duża pracochłonność obliczeń: Algorytm Łomnickiego i Browna – Łomnickiego. W algorytmie Johnsona wadą jest ograniczenie się jedynie do dwóch brygad roboczych. Model symulacyjny nie gwarantuje natomiast uzyskania poprawnego wyniku.

W rozdziale 3.2. Modele szeregowania zadań stosowane w produkcji przemysłowej został przedstawiony przegląd najpopularniejszych deterministycznych modeli szeregowania zadań. Należy zauważyć że kryteria jakie są brane w tych modelach pod uwagą to: całkowity czas, ciągłość pracy brygad oraz dyrektywne terminy zakończenia prac na określonych działkach.

W produkcji przemysłowo – wytwórczej jesteśmy w stanie wybrać najważniejsze kryterium, inaczej jest w budownictwie. Problemem w stosowaniu modeli w produkcji budowlane jest to, że nie ma w nich możliwości stosowania wszystkich kryteriów w tym samym czasie. Dodatkowo dla budownictwa ważniejsze są modele probabilistyczne, ponieważ w odróżnieniu do produkcji fabrycznej środowisko budowy jest bardzo niejednorodne i zmienne, co wpływa na zwiększoną wielokrotnie ilość czynników ryzyka. Materializacja tych czynników może mieć duży wpływ na czas trwania danej czynności. Zmiana czasu nierzadko będzie powodować całkowitą zmianę uszeregowania.

Modele mogą natomiast znaleźć swoje zastosowanie na etapie przygotowania harmonogramów realizacji inwestycji. Szczególnie w przypadku planowania budowy o dużej ilości działek powtarzalnych. Przykładem takich budów są prace wykończeniowe w obiektach galerii handlowych lub w budynkach mieszkaniowych.

W rozdziale 4 przedstawiono kryteria szeregowania zadań. Pierwszą część stanowią kryteria ogólne stosowane w przenajróżniejszych modelach szeregowania zadań. Budownictwo różni się bardzo od produkcji przemysłowej, wiele przykładów tych różnic można znaleźć w powyższym artykule. Kryteria opracowane na potrzeby produkcji przemysłowej, są zatem nierzadko niewystarczające. W ostatniej części artykułu przedstawiono zbiór opracowanych i opisanych kryteriów szeregowania zadań dedykowanych specjalnie dla potrzeb wspomagania szeregowania zadań w opracowywaniu wykonawczych harmonogramów budowlanych.

Artykuł stanowi zatem podsumowanie obecnego stanu wiedzy, w części dotyczącej opisu modeli już opracowanych i stosowanych, a także w części opisujące podstawowe kryteria szeregowania zadań. Opracowany, opisany i na nowo zebrany zbiór kryteriów dla budownictwa stanowi natomiast bazę do opracowania modelu który sprawdzałby się w warunkach budownictwa, jeżeli nie w stu procentach to chociaż bardziej znacząco niż modele używane dotychczas. Taki model jest aktualnie przedmiotem pracy autora

CRITERIA AND MODELS OF SCHEDULING IN CONSTRUCTION

Abstract

The article discusses the characteristics of the construction process with reference to job shop and flow shop models. Paper also presents the basic scheduling model used in the preparation of implementing construction schedules. Presented is a set of criteria they used. In addition, a set of criteria has been developed strictly dedicated to the needs of the construction industry.

BIBLIOGRAFIA

1. Butterworth R.: *Scheduling theory*, Department of Combinatorics and Optimization, University of Waterloo 1979,
2. Coffman jr. E.G.: *Teoria szeregowania zadań* Wydawnictwo Naukowo + Techniczne 1980
3. Dytczak M., Ginda G., Wojtkiewicz T.: *Identyfikacja roli czynników opóźnień realizacji złożonych przedsięwzięć budowlanych* Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Vol. 2, no. 4, s. 481—485, 2011
4. Jaśkowski P., Biruk S.: *Ocena porównawcza mierników odporności harmonogramów budowlanych* Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Vol. 2, no. 4, s. 501—505, 2011
5. Jaworski K. M.: *Metodologia projektowania realizacji budowy*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2009,
6. Kalinowski K., Grabik C.: *Integracja systemów Proedims i KbRS w zakresie harmonogramowania produkcji. Model zlecenia produkcyjnego* Wybrane Problemy Inżynierskie, nr 2, s. 177—180, 2011
7. Krzemiński M., Nowak P.: *Propozycja modyfikacji kosztowej algorytmu Johnsona do szeregowania zadań budowlanych*, KONFERENCJA NAUKOWO - TECHNICZNA INŻYNIERIA PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH oraz 13th GERMAN - LITHUANIAN - POLISH COLLOQUIUM, Białystok - Augustów - Wilno, 09 -12

października 2011, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej "Budownictwo i Inzynieria Środowiska", 2011, vol. 2, no. 3, str. 323-327, ISSN 2081-3279
8. Kuchta D.: *Zagadnienie czasu i kosztów w zarządzaniu projektami : wybrane metody planowania i kontroli*, Politechnika Wrocławska 2011,
9. Marcinkowski R., Pokora M.: *Koncepcja szeregowania zadań dla brygad specjalistycznych w modelach przedsięwzięć typu "kompleks operacji"*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, Vol.91, nr 20, s. 259-268, 2008
10. Pinedo M. L.: *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, Springer 2012,
11. Pinedo M. L.: *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, Springer 2009,
12. Podolski M.: *Analiza nowych zastosowań teorii szeregowania zadań w organizacji robót budowlanych* Rozprawa doktorska, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Raport serii PRE nr 5/08, 2008
13. Połoński M.: *Harmonogramy sieciowe w robotach inżynieryjnych*, Wydawnictwo SGGW 2001,
14. Reid R. D., Sanders N. R.: *Operations management* 3rd Edition Wiley 2007

Autor:
dr inż. Michał KRZEMIŃSKI – Politechnika Warszawska, WIL