

Modelowanie przedsięwzięć budowlanych w ujęciu harmonogramów 4D BIM z retrospektywą

Modelling of construction projects in 4D BIM harmonograms approach with retrospective

dr inż. Tomasz Wiatr (ORCID: 0000-0002-8352-0508),
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Politechnika Poznańska

DOI 10.5604/01.3001.0053.8497

Streszczenie: W artykule przedstawiono problematykę harmonogramów budowlanych w ujęciu 4D BIM. W części dotyczącej harmonogramów klasycznych przedstawiono ponadczasowe znaczenie harmonogramów Adameckiego uznawanych za podstawę metod sieciowych. Harmonogramy budowlane w ujęciu metody pracy równomiernej (metod potokowych) potraktowano jako podstawę selekcji oprogramowania klasy PMS w kontekście klasy modelu sieciowego i typów powiązań logicznych w notacji PDM. Konieczność posiadania przez program funkcjonalności tworzenia modeli opartych na zasadzie acyklicznego multigrafu dwupunktowego uznano za paradygmat. Zidentyfikowano dwanaście programów pozwalających dzięki temu na definiowanie więcej niż jednego powiązania logicznego pomiędzy dwoma procesami. Metody sklasyfikowano pod względem klas integracji w kontekście 4D BIM, w tym także podejścia z wykorzystaniem systemu klasy PMS nieposiadającego funkcjonalności 4D BIM za sprawą równoległego przetwarzania modelu IFC w oddzielnym programie w celu wizualizacji działań roboczych jako podstawy harmonizacji w przedsięwzięciu budowlanym. Artykuł osadzony jest w kontekście Open BIM opartym na interoperacyjności w przedsięwzięciach budowlanych.

Słowa kluczowe: harmonogramy, 4D BIM, oprogramowanie PMS, metody sieciowe, notacja PDM oraz opcje MDM i UDM.

Abstract: The article presents the problem of construction schedules in terms of 4D BIM. In the section on classical schedules, the timeless importance of Adamecki's harmonograms (schedules) considered as the basis of network methods is presented. Construction schedules in terms of the steady work methods (flow methods) were treated as the basis for the selection of PMS class software in the context of the network model class and types of logical dependencies in PDM notation. The need for the program to have the functionality of creating models based on the principle of an acyclic two-point multigraph was considered as a paradigm. Twelve programs have been identified that allow to define more than one logical dependency between two processes. Methods were classified in terms of integration classes in conditions of 4D BIM, including the approach using a PMS class system that does not have 4D BIM functionality due to the parallel processing of the IFC model in a separate program to visualize work packages as a basis for harmonization in construction project. The article is set in the context of Open BIM based on interoperability in construction projects.

Keywords: harmonograms, 4D BIM, PMS software, network methods, PDM notation, MDM and UDM options.

1. Wprowadzenie

Dla całego budownictwa, jako dziedziny aktywności gospodarczej człowieka, tematem ważkim jest obecnie cyfryzacja w ujęciu BIM (*Building Information Modelling*), która nie powinna być jednak celem, lecz środkiem do celu w postaci doskonałych przedsięwzięć. Obecnie w wielu krajach świata podejście BIM podlega implementacji, choć problematyka mogąca być podejmowaną w ramach podejścia BIM jest bardzo szeroka, a problemy których nie rozwiązano wcześniej, mogą pozostać nierozwiązane mimo podejścia BIM. Pewne problemy uda się dzięki BIM rozwiązać, ale też samo BIM jest wyzwaniem o charakterze problemowym. Niniejszy artykuł dotyczy w tym zakresie tematyki modelowania przedsięwzięć budowlanych w ujęciu harmonogramów klasy 4D BIM, nawiązując silnie do metod klasycznych jako

wyrazu ciągłości wiedzy i dokonań ludzi na przestrzeni dekad, gdyż wiedza techniczna ma charakter stosowany, a to, co teraz powstaje, poszerza zasób wiedzy aktualnie stosowanej w trybie doskonalenia.

Inżynieria przedsięwzięć budowlanych, jako część inżynierii budowlanej, w znacznym zakresie operuje metodami naukowej organizacji pracy czy też naukowego zarządzania, w tym przypadku zarządzania przedsięwzięciami. Wiedza ta w ciągu ostatnich dekad doświadcza przytłaczającego wprost wzrostu liczby metod, technik oraz analiz szczegółowych problemów, które bywają często dysertabilne, choć niewnoszące nowej wiedzy ani jej nieporządkujące. Są jednak pewne problemy fundamentalne, które nie tracą na aktualności jako ponadczasowe, zwłaszcza jeśli występuje harmonia w zakresie ich współistnienia z tym, co powstaje. W przesłaniu autora do kategorii problemu

fundamentalnego zalicza się harmonizacja oraz harmonogram jako metoda, która dzięki wspomaganemu komputerowemu Open BIM zyskuje nowe oblicza, pozwalając obrazować czasoprzestrzennie obiekty budowlane w dążeniu do optymalizacji kompleksowej z wykorzystaniem formatu IFC (*Industry Foundation Classes*).

2. Harmonogramy klasyczne

Zasadę harmonizacji, metodę harmonogramu i przyrząd o nazwie harmonograf stworzył prof. Karol Adamiecki i było to wydarzenie znaczące i wcześniejsze niż wprowadzenie do stosowania tak zwanego wykresu Gantta, którego nazwę Henry Gantt niejako zainicjował. Edward Marsh zwraca uwagę [19] odnosząc się do artykułu [11], że: „Gantt opisał swój dzienny bilans jako „graficzny”, (jednakże - prz. aut.) należy go uznać za podejście „tabelaryczne”, ponieważ nie zastosowano żadnego wykresu”. Kontynuator Wallace Clark [6] stosuje tego rodzaju wykresy, jednak również w większości nie przypominają jeszcze harmonogramu, a jedynie wykresy słupkowe w układzie poziomym ze wspólną podstawą. Dla odmiany zestaw artykułów Karola Adamieckiego [1] referowany przez Edwina Hauswalda [13] liczy 4 części [1], z których 3 przedstawiają ich wiele, i to zaawansowanych. Według Petera Morrisa w Oxford Handbook of Management [21] podkreślona jest chronologia, a więc: harmonogramy Adamieckiego – 1903 rok i wykresy Gantta – 1917 rok.

W języku angielskim słowo *schedule* jest wieloznaczne, a harmonogram nie jest nawet jego znaczeniem podstawowym, co racjonalnie uzasadniło wprowadzenie nazwy Gantt Chart jako brakującej w tym języku nazwy własnej konkretnego opracowania. W Polsce nierzadko stosuje się nazwę wykresy Gantta, co nie jest bynajmniej konieczne, jeśli mowa o harmonogramie, jako takim, który zresztą za granicą bywa nazywany harmonogramem Adamieckiego lub po prostu harmonogramem [4, 19]. Warto jednak podkreślić, że Henry Gantt był ceniony przez samego Karola Adamieckiego, który w założonym przez siebie w 1928 roku czasopiśmie „Przegląd organizacji” upowszechniał harmonograf, ale też przyrząd nazwany tam gantografem (odkrycie na podstawie analizy archiwów czasopisma), oba wytwarzane przez instytut, który zresztą doprowadził do wydania polskiego tłumaczenia książki Clarka pod polskim tytułem Wykresy Gantta [6] (Gantta w wydaniu z 1929 roku), co jest wyrazem harmonii dorobku tych pionierów naukowej organizacji pracy.

W tym miejscu trzeba podkreślić właściwość ponadczasową harmonogramów Adamieckiego. Jak zauważa Edward Marsh (m.in. w [19]): „w istocie harmonogramy Adamieckiego były różnymi diagramami sieci przepływu pracy (w oryginale *workflow networks diagrams*), które dawały graficzne rozwiązania problemów produkcyjnych. Znaczący jest fakt, że koncepcja diagramów przepływu pracy była stosowana w Polsce już w 1896 roku. Współcześnie sieci przepływu pracy kojarzone są z rodziną metod, która zaczęła się rozwijać

około 1957 roku w Stanach Zjednoczonych. (...). Szczególnie interesujące we wcześniejszej koncepcji sieci przepływu pracy Adamieckiego jest to, że łączyła ona najlepsze cechy wykresów Gantta z koncepcją sieci”. Miklos Hajdu [12] twierdzi wprost, że „historia technik planowania sieciowego rozpoczęła się w 1931 roku, kiedy Karol Adamiecki opracował swój Harmonograph”, cytując przy tym [2] i książkę [20] dotyczącą wszakże metod sieciowych. Kontynuację dzieła podkreślano obecnie w [18].

O znaczeniu harmonogramów dla budownictwa świadczy artykuł w czasopiśmie „Przegląd Budowlany” autorstwa Wacława Przeszńskiego już w 1929 roku [23] i w wersji rozbudowanej rok później w kontekście kongresu w Londynie. Ponadto godnym odnotowania jest fakt, że już w 1950 roku powstała w Polskim Komitecie Normalizacji pierwsza wersja normy [22]. Jak informuje prof. Leon Rowiński w swych książkach, 2 części normy powstały przy wykorzystaniu teorii zawartej w opracowaniu autorstwa prof. Aleksandra Dyżewskiego [24], który uznawany jest za twórcę metodyki harmonogramów budowlanych, a trzeba podkreślić, że rok wcześniej Aleksander Dyżewski opublikował swą rozprawę doktorską [8] dotyczącą istotnej w omawianym kontekście doktryny pracy równomiernej. Co do normy Leon Rowiński przytacza później jej wersję PN-79/B-07101.

3. Harmonogramy komputeryzowane

Jak już przypomniano powyżej, metody sieciowe jako metody obliczeniowe powstały w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku wraz z oprogramowaniem komputerowym. Cytując za [28]: „program, który opracowali został przetestowany (...) w 1957 r., a ich pierwszy artykuł na temat planowania ścieżki krytycznej został opublikowany w marcu 1959 roku. System PERT został opracowany mniej więcej w tym samym czasie, ale (przedstawiony – prz. aut.) później od CPM o 6–12 miesięcy (choć termin „ścieżka krytyczna” został wymyślony przez zespół PERT)”. Mowa tu o artykule [17]. Podstawową notacją stanowił zapis „czynność na łuku” (*Activity On Arc* – AOA), jednakże już wtedy inżynier budownictwa [10] John Fondahl według [20]: zajmował się podejściem diagramu węzłowego do podstawowego problemu CPM. Mniej więcej w tym czasie rozwój tzw. metody potencjałów miał miejsce we Francji. Opierał się na logice sieciowej, która ograniczała rozpoczęcie jednej czynności opóźnieniem o określoną ilość czasu od rozpoczęcia poprzedniej czynności. W pewnym sensie był to prekursor rozwoju „diagramów wyprzedzenia” (w oryginale *precedence diagrams*), który miał miejsce w Stanach Zjednoczonych w latach sześćdziesiątych.

Powyżej mowa o notacji „czynność na węźle” (*Activity On Node* – AON) znanej jako ADM (*Arrow Diagramming Method*) i metodzie znanej jako PDM (*Precedence Diagramming Method*) przeciwstawnej w stosunku do koncepcji ADM stosowanej pierwotnie w CPM (*Critical Path Method*). Trzeba

tutaj dodać coś do relacji amerykańskiego autora uwzględniając europejski kontekst, gdyż występuje pewna kontrowersja. Jak zauważa Miklos Hajdu [12], wracając do roku 1958, kiedy francuski naukowiec Bernard Roy opracował swoją „metodę potencjałów”. Jego metoda wykorzystywała reprezentację „czynność na węźle” i wprowadził on relację wyprzedzenia *Start-to-Start* (SS)¹ z czynnikami wyprzedzania/opóźniania (...). Prace te były bardzo ignorowane, zwłaszcza w Stanach Zjednoczonych, ale nieanglojęzyczna Europa nadal używa nazwy MPM (*Metra Potential Method*) zamiast *Precedence Diagramming* w odniesieniu do pracy Roya”. Mowa o artykule [25]. Aby wyjaśnić kontrowersję, najlepiej odwołać się do teorii grafów, która, jak wiadomo [3], jest podstawą teorii metod sieciowych.

¹ W terminologii niemieckojęzycznej [27] „Anfangsfolge – AF (AA) ekspozuje również znaczenie rozpoczęcia (jak w MPM), choć jasne jest, że również powiązanie Finish-to-Finish (FF), a więc Enfolge – EF (EE) może decydować pośrednio także o rozpoczęciu następnika.

MPM jest metodą zaawansowaną i opiera się na koncepcji multigrafu, gdyż wierzchołkowi grafu (węzłowi modelu) przyporządkowana jest zwykle więcej niż jedna gałąź grafu (ściśle rzecz biorąc dwie), ale kluczową podstawą zaawansowania jest inna cecha, a mianowicie cykliczność, co nie umniejsza oczywiście znaczenia pierwszej, którą model sieciowy zyskał po raz pierwszy właśnie w metodzie MPM, a więc w 1958 roku. Konwencja stosowana pierwotnie w CPM to unigraf acykliczny² w sensie teorii grafów, natomiast w odniesieniu do PDM istnieje we współczesnej literaturze niespójność rodząca problem przedstawiony poniżej, który po części wynika z samego przeciwstawiania sobie PDM i MPM, gdy tymczasem jest pewien przypadek, którego się nie dostrzega w tym dyskursie a jest kluczowy. O ile w MPM

² W początkach stosowania metod sieciowych spotykane były programy dopuszczające stosowanie modelu sieciowego o postaci multigrafu, gdzie 2 różne czynności mogły mieć wspólne zdarzenie początkowe i końcowe, ale w późniejszej fazie rozwoju to podejście porzucono.

Tabela 1. Klasyfikacja poziomów modelowania sieciowego z reprezentacją analityczną i graficzną modelu oraz komentarzem i przykładami³

Poziom modelowania sieciowego	Reprezentacja analityczna w modelu sieciowym	Reprezentacja graficzna diagramu sieciowego	Objaśnienia wraz z przykładami systemów komputerowych i krajem ich pochodzenia oraz komentarzem
D0			Model jednopunktowy z wyłącznie jednym z czterech przypadków powiązań – np. p2ware Project Manager (PL), MS Project (US), CS Project (UK) i inne. Poza ograniczeniami w zakresie modelowania występuje problem stratnej informacji przy imporcie modeli z systemów klas wyższych.
D1			Model analitycznie dwupunktowy z uproszczoną jednopunktową reprezentacją graficzną – np. PMC Planista Plus (PL) i Vico Project Scheduler Standard (FI). Zwłoka obu powiązań (linia pogrubiona na rysunku) składających się na powiązanie złożone jest z konieczności jednakowa. Nie można ich łączyć z innymi powiązaniem.
D2			Model analitycznie i graficznie dwupunktowy z możliwością stosowania dowolnej kombinacji powiązań – np. Deltek OpenPlan Pro (US), Pertmaster/OPRA (UK/US), Phoenix PM (US), Primavera PM (US), Plexos Project (ES), Safran Project (NO), Spider Project (RU), Synchro Pro (UK/US).
D3			Model wielopunktowy – PowerProject (UK). Początkowo program posiadający jedynie zewnętrzny moduł o nazwie Powernet (DE), obecnie moduł wewnętrzny Network Viewer operujący powiązaniem, jak dla poziomu D2 w przeciwieństwie do diagramu belkowego.
D4			Model cykliczny – ACOS Plus (DE) reprezentujący rozwiniętą metodę MPM w znormalizowanej wersji stosujący specjalny obraz powiązania (z podwójnym grotem), jeśli jest to powiązanie złożone, w przeciwnym razie postać powiązania jest podobna do tej znanej z pozostałych systemów.

³ W pracy [16] wyjaśniono możliwe przypadki powiązań w programach Pertmaster i Project przedstawione przez autora, które zostały zacytowane w pracy [15], jednak z błędami w tabelach 22.12 i 22.13 (przez zmianę oznaczeń powiązania SF na FS bez zmiany opisu).

model jest mutligrafem cyklicznym, o tyle w PDM model jest grafem acyklicznym, który może być multigrafem lub tylko unigrafem i oba te przypadki mają fundamentalne znaczenie w kontekście dalszych wywodów tworząc pewne fundamentalne rozróżnienie zaproponowane poniżej.

Należy stwierdzić, że notacji „czynność na łuku” stosowanej pierwotnie w CPM faktycznie przeciwstawiono notację „czynność na węźle” stosowaną w PDM i MPM, jednakże w drugim przypadku istotna jest inna cecha, a mianowicie dwupunktowość. Jakkolwiek obecnie zdecydowana większość programów klasy PMS (*Project Management and Scheduling*) stosuje notację „czynność na węźle”, to jest między nimi zasadnicza różnica. Wśród programów klasy PMS wiele operuje modelem, który jest unigrafem, mimo iż model jest dwupunktowy, a tylko pewna część pozbawiona jest tego ograniczenia, pozwalając tym samym na tworzenie modelu sieciowego opartego na założeniach mutligrafu i to ten właśnie sposób należy uznać za kluczowy. Norma brytyjska [5] nie wyklucza tego rodzaju powiązań (mowa o notce numer 3 załącznika informacyjnego A normy następującej treści: „Zależności nie są ograniczone do pojedynczego stosowania i mogą być używane w połączeniu”). Ponadto Moder i Philips [20] stosują określenie powiązania złożonego, które zidentyfikowano obecnie w dwóch programach, w tym jednym polskim.

Trzeba dodatkowo podkreślić, że programy w przeważającej mierze operują powiązaniem typu „nie wcześniej niż” natomiast powiązania w MPM przedstawiają zakres zwłoki jako przedział czasu zawarty pomiędzy czasem zwłoki obu powiązań o przeciwnym zwrotach, w szczególności równym co do wartości bezwzględnej oznaczający rozpoczęcie natychmiast po upływie zadanego czasu, w przypadku szczególnym natychmiast. MPM w czystej postaci występuje w jednym programie dostępnym komercyjnie (mowa o programie Acos Plus będącym niejako implementacją metody MPM znormalizowanej w Niemczech [7]). Istotna jest wobec tego klasa programów wykorzystująca dwupunktową wersję PDM. Uznając za konieczną możliwość modelowania metody pracy równomiernej jako przejawu harmonizacji, trzeba uznać za konieczne operowanie modelem opartym na dwupunktowej notacji multigrafu, co niniejszym stawia się jako paradygmat. Bez uznania tego paradygmatu nie sposób w programie utworzyć harmonogramu w myśl doktryny pracy równomiernej bez nadmiarowości modelu w postaci „zdarzeń pozornych” jako dodatkowych kamieni milowych uwarunkowanych w sposób sztuczny brakami odpowiednich powiązań.

Na podstawie analizy dostępnych rozwiązań współcześnie zidentyfikowano 12 programów spełniających wymagania w przedstawianym kontekście. Aby uporządkować problem i wyeliminować niejasności, byłoby wskazane wprowadzenie nowego nazewnictwa, a więc MDM (*Multigraph Diagramming Method*) i UDM (*Unigraph Diagramming Method*), choć nie tworzy to nowych metod, a jedynie

dychotomiczne podklasy metody. Klasyfikację możliwych poziomów modelowania w kontekście możliwych do stosowania powiązań, w tym ich kombinacji przedstawiono w tabeli 1. Podstawą są zawsze 4 podstawowe powiązania wynikające z punktów Początek i Koniec, a więc PP, KK, jak i PK i KP (odpowiednio SS, FF, FS i SF w języku angielskim) nazywane tutaj przypadkami prostymi. W tabeli nie uwzględniono programu BIMestiMate firmy Datacomp z racji jego specyfiki, jednakże należy zwrócić uwagę na jego dojrzałość w zakresie modelu powiązań logicznych spełniających przedstawiane wymagania, choć bez widoku diagramu sieciowego.

4. Harmonogramy budowlane

Według Aleksandra Dyżewskiego (m.in. [9]) wśród harmonogramów trzech rodzajów harmonogramy dyrektywne sporządzane są we wstępnym projekcie organizacji budowy i obejmują cały jej przebieg, harmonogramy ogólne to harmonogramy poszczególnych obiektów, obejmujące cały czas ich wykonania, a harmonogramy szczegółowe to harmonogramy dotyczące poszczególnych obiektów lub ich części oraz robót, opracowywane dla krótkich okresów czasu (od miesiąca i krócej). Według [9] podstawowym harmonogramem budowlanym jest ogólny harmonogram budowy. Jako warunki metody pracy równomiernej poza cyklicznością podaje się ciągłość, równomierność oraz rytmiczność i wprowadzone zostają zależności matematyczne. Aleksander Dyżewski przedstawia ilustrację problemu podziału na działki robocze z krzywą sumowanej ilości robót (przykład ten przytacza później także Kazimierz Jaworski w pracy monograficznej [15]) i elementarną terminologię opisującą 4 możliwe sposoby ruchu brygad w kierunku poziomym i pionowym, jako wstępujący i zstępujący, co wyraża elementarnie aspekt przestrzenny, natomiast krzywą sumowanej ilości robót można uznać za połączenie idei cyklogramu i esogramu.

Według Leona Rowińskiego (m.in. [24]) harmonogram dyrektywny realizacji przedsięwzięcia powinien ujmować wszystkie zadania zapewniające pełny efekt produkcyjny lub użytkowy i proponowany jest przy tym wzorzec harmonogramu dyrektywnego rzeczowo-finansowego. Harmonogramy ogólne stanowią aktualizację oraz dokładniejsze opracowanie w odniesieniu do działań, których termin nie przekracza dwóch lat. Stosowane jest zestawienie analityczne zgodne z PN-B/79-07101 i pomocnicze, liczące 10 kolumn, zestawienie elementów obiektu oraz procesów i pracochłonności przeznaczone do scalania danych oraz twierdzenie, iż harmonogram ogólny powinien mieć pozycje analogiczne do pozycji tabeli elementów rozliczeniowych kosztorysów obiektów. Harmonogramy szczegółowe stanowią analogicznie aktualizację i uszczegółowienie harmonogramu ogólnego, opracowywane są z zasady dla kolejnych miesięcy realizacji, jak również w odniesieniu

do powtarzających się fragmentów realizowanej konstrukcji. Proponowana była pomocnicza część analityczna licząca aż 15 kolumn z odniesieniem do harmonogramu ogólnego.

Cytowane dzieła obu autorów powstawały pierwotnie po powstaniu metod sieciowych, jednakże przed umasowaniem mikrokomputerów, co doprowadziło do pewnej dwoistości prowadzącej do porównywania harmonogramów i modeli sieciowych, w szczególności ich diagramów. Wprowadzenie notacji AON wyeliminowało to zjawisko, gdyż reprezentacja węzłowa procesów utrudnia ich skalowanie. Wynikło to z wyeliminowania przez producentów oprogramowania notacji AOA (później w programach pojawia się „harmonogram w powiązaniach”). Zjawisku temu starano się przeciwstawić w ramach powstałej w roku 2000 Project Management Institute jednostki College of Scheduling – PMCOS (od 2013 roku oddzielnej organizacji), która skupiając specjalistów z zakresu planowania przedsięwzięć miała na celu wywarcie nacisku na producentów oprogramowania klasy PMS tak, aby nie porzucać klasycznej notacji ADM. Praktykę planowania badano za granicą, w tym wśród 400 największych przedsięwzięć budowlanych i w poradniku [29] opisano to zjawisko, mając na względzie pozytywny wpływ na polską praktykę w tym zakresie.

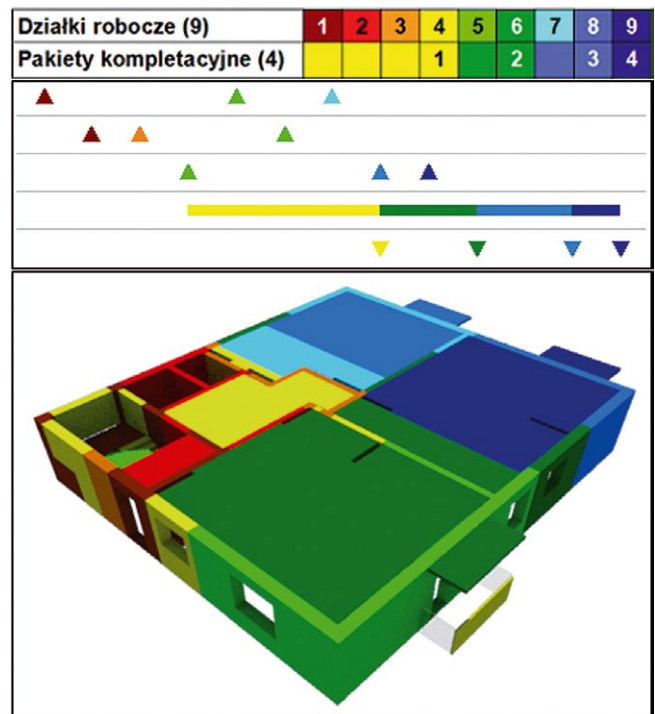
W odniesieniu do esogramów w kontekście metod sieciowych nie należy mówić o jednym esogramie, skoro są to w istocie esogramy graniczne odnoszące się do terminów najwcześniejszych i najpóźniejszych, a więc przypadki skrajne wynikające z analizy modelu sieciowego, gdyż każdy z harmonogramów powstałych na podstawie modelu sieciowego reprezentowany jest przez odpowiedni esogram syntetyczny. W przypadku harmonogramu reprezentującego w pełni metodę pracy równomiernej nie ma zapasów czasu w klasycznym sensie, gdyż są one ukryte jako tzw. rezerwa gorąca, znana z teorii niezawodności, a wtedy esogram jest w istocie jeden. Harmonogram można przedstawić również w sposób wyrażający wprost zapasy czasu poszczególnych procesów, jeśli nie można ich uniknąć (rodzaj tzw. zimnej rezerwy w ww. sensie), wtedy jednak krzywe graniczne są do siebie bardzo zbliżone, a tzw. strefa manewru (pojęcie za [16]) jest minimalna. W obu tych przypadkach esogram wprowadzony przez twórcę tego pojęcia i metody, a więc Zygmunta Rytlea ma dodatkowe uzasadnienie w ujęciu wzorcowym czy też normatywnym. Zygmunt Ryteł nazywa go później nawet [26] harmonogramem normatywnym.

5. Harmonogramy czasoprzestrzenne

Pomijany pierwotnie aspekt harmonogramu to przestrzeń 3D obiektu, którego reprezentacja ma jedynie pośrednio odzwierciedlenie. Aspekt czasoprzestrzenny wprowadza metoda cyklogramu zastosowana w budownictwie jako

uzupełnienie harmonogramu lub jego zastępnik. O ile klasyczny harmonogram jest wykresem dwuosiowym z osią czasu, o tyle harmonogram zintegrowany z cyklogramem można traktować jako wykres trójosiowy zwany wręcz harmonogramem trójosiowym (pojęcie za Józefem Czachorowskim). Trójosiowy charakter stanowi kres możliwości zwartej prezentacji rozwiązania w ujęciu graficznym, stanowiąc najbardziej rozbudowaną postać harmonogramu, zwłaszcza jeśli procesy mają charakter cykliczny, a więc powtarzalny. Interesujące poznawczo powiązanie metody harmonogramu i cyklogramu stanowią tzw. diagramy równoległobokowe [14].

Współczesne wyzwanie stanowi związek modelu trójwymiarowego 3D z harmonogramem jako podejście znane jako 4D wyrażające charakter czasoprzestrzenny harmonogramu czy też dynamiczne ujęcie modelu 3D (rysunek 1).



Rys. 1. Statyczny obraz modelu 4D BIM kondygnacji powtarzalnej średniowysokiego budynku mieszkalnego (barwy identyfikują działki)

Bliższa analiza sugeruje, aby traktować BIM jako wyłącznie trójwymiarowe podejście łączące 3 klasy oprogramowania, a więc w ujęciu schematycznym 3D (BIM=CAD+FEA+PMS) w rozumieniu typologii według [30], gdzie BIM to triada systemów modelowania i analizy w ujęciu geometrii analitycznej CAD, modelowania i analizy w ujęciu metody elementów skończonych FEA oraz modelowania i analizy w ujęciu metod sieciowych PMS. W projekcie [31] model osiedla powstał w oparciu o tzw. komponenty projektowo-wykonawcze, aby godzić wymagania tych trzech klas oprogramowania Open BIM.

Biorąc pod uwagę badania związane z harmonogramami przedsięwzięć budowlanych, a następnie z BIM

zaproponowano we wcześniejszym artykule [32] pięciostopniową klasyfikację poziomów zdefiniowania harmonogramu LOD (*Level of Definition*) jako połączenia miary geometrycznej LOG (*Level of Geometry*) związanej z graficznym odwzorowaniem i miary nasycenia informacją LOI (*Level of Information*). W skrócie względem [32] w klasyfikacji poziom LOD 100 odpowiada harmonogramowi dyrektywnemu, LOD 200 – harmonogramowi ogólnemu, a LOD 300 – to poziom harmonogramu uszczegółowionego w zakresie podziału na kondygnacje. W tym ujęciu LOD 400 stanowi poziom harmonogramu szczegółowego operujący działkami roboczymi, a LOD 500 to operowanie poszczególnymi komponentami oddzielnie, jako przypadek skrajny. Można również wyróżnić poziomy pośrednie LOD 250 i 350, a nawet 450 biorąc pod uwagę specyfikę modelowanych obiektów budowlanych.

Przykładowy podział na działki robocze oraz tzw. pakiety komplekcyjne (proponowane pojęcie własne) wraz z fragmentarycznym harmonogramem dotyczącym przedstawionej kondygnacji ilustruje rysunek 1. Pakiet komplekcyjny wyraża aspekt wewnętrznej kooperacji brygad, obrazując przejściowe minimum odbiorowe, a więc komplet komponentów, które trzeba wbudować na danym etapie prac. Stanowi to swoisty półprodukt realizujący ważne cele pośrednie procesu produkcyjnego, których osiągnięcie ma nieco mniejszą rangę, niż tzw. kamień milowy stosowany w modelowaniu sieciowym.

Przedstawione w niniejszym punkcie rozważania wyrażają dążenie do racjonalnej liczby procesów w harmonogramie.

Jakkolwiek zalecane liczby maksymalne procesów w harmonogramie ogólnym znajdujące się w zakresie od 40 do 60 pozycji (zależnie od autora) są dość zachowawcze, to jednak faktem jest, że duży harmonogram utrudnia ogląd całości planu z użytkowego punktu widzenia. Trójpodział harmonogramów klasycznych w przedstawionym ujęciu wyraża ideę planowania kroczącego metodą od ogółu do szczegółu, natomiast współczesne programy klasy PMS operują głównie metodą od szczegółu do ogółu.

Systemy klasy PMS mogą operować tysiącami procesów, jednakże ujęcie BIM skłania do przyjęcia pewnych granic. Przyczyną uszczegóławiania harmonogramu nie są wyłącznie moce obliczeniowe i pamięć komputera (zwłaszcza w ujęciu BIM), ale też przydatność harmonogramu jako takiego, ponadto aspekt powtarzalności pewnych elementów. Aby uwzględnić te uwarunkowania, zaproponowano poziomy integracji, które wychodzą naprzeciw tworzeniu harmonogramów komputerowanych. Reprezentacja trójwymiarowa w ujęciu działek roboczych może być uznana na czasoprzestrzenny odpowiednik harmonogramu, de facto harmonogram topograficzny 3D.

6. Harmonogramy zintegrowane

Biorąc pod uwagę kluczową, techniczną stronę zagadnienia, można w różny sposób uzyskiwać oczekiwany rezultat w postaci przedstawienia podziału na działki w ujęciu BIM. Rezultat ten jest fundamentalny dla stosowalności metody pracy równomiernej. Algorytm wyznaczenia działek roboczych

Tabela 2. Klasyfikacja poziomów integracji modelu 3D BIM i harmonogramu do postaci 4D BIM z przykładami

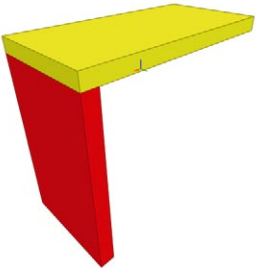
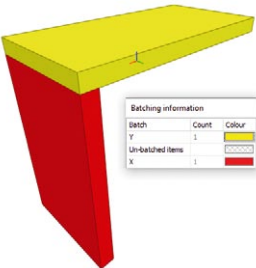
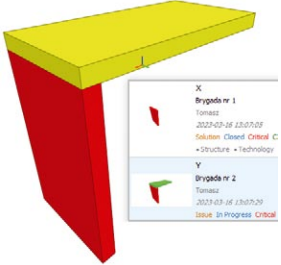
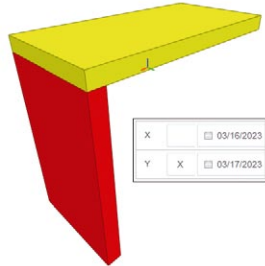
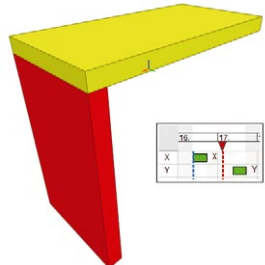
Klasa integracji harmonogramu	Charakterystyka poszczególnych klas z komentarzem do integracji w ujęciu Open BIM z wykorzystaniem formatu IFC	Ilustracja poglądowa (kompilacja części systemów)
H0	Reprezentacja komponentów modelu 3D w oparciu o bezpośrednie kodowanie barwne w przyjętej skali barw umownych. Poziom ten można osiągnąć wprost w modelu źródłowym i w systemie, który służy do projektowania obiektu budowlanego, zwłaszcza jeśli tworzony jest w nim projekt wykonawczy. Kluczowe jest oczywiście podejście Open BIM, które można urzeczywistnić w oparciu o plik IFC poddany dalszej analizie w przeglądarce BIM wyposażonej w specjalne nakładki wprost, czy to wyłącznie w pliku IFC przy użyciu innego programu do modelowania BIM czy to w pliku IFC wraz z towarzyszącym mu plikiem dodatkowym.	
H1	Identyfikacja komponentów 3D w oparciu o kod alfanumeryczny jako podstawę obrazowania, w tym filtrowania lub zmiennej w czasie reprezentacji. Na tym poziomie kluczem jest przyporządkowanie kodu alfanumerycznego (w pliku źródłowym, w pliku wymiany IFC czy też w pliku mu towarzyszącym) poszczególnym komponentom tworzącym działki, aby później można było nimi operować w trybie selekcji (filtrowania) lub nadawania kodów barwnych, czy to stałych czy zmiennych. W drugim przypadku działka bieżąca ma z założenia barwę wyróżnioną, a działki już wykonane i jeszcze niewykonane barwy odmienne.	

Tabela 2. cd.

Klasa integracji harmonogramu	Charakterystyka poszczególnych klas z komentarzem do integracji w ujęciu Open BIM z wykorzystaniem formatu IFC	Ilustracja poglądowa (kompilacja części systemów)
H2	<p>Obrazowanie selektywne komponentów 3D wraz z informacjami dodatkowymi. Na tym poziomie oczekuje się, aby poszczególnym działkom towarzyszyły syntetyczne informacje, które klasycznie ujmowane są w standardowej kolumnie o nazwie „składy jednostek produkcyjnych” według PN/B. Dzięki tej informacji obraz podziału na działki tworzy wraz z komentarzami zwartą dokumentację. Może być ona traktowana jako wydzielona relatywnie część dokumentacji budowy, do czego można wykorzystać także format BCF (BIM Collaboration Format), co wzmiankowano już w artykule [31], choć jest to nowatorskie zastosowanie tego formatu danych służącego zwykle tylko do bieżącej komunikacji.</p>	
H3	<p>Przyporządkowanie dat, w tym także dat względnych jako harmonogramu niewyrażonego wprost, ale interpretowalnego jako wizualna symulacja 4D. Poziom taki wymaga, aby program operujący modelem zawierał funkcjonalność interpretacji przynajmniej umownych przedziałów czasu, przy czym nie jest wymagane posługiwanie się powiązaniem, choć te mogą ułatwiać znacznie wprowadzanie danych poprzez wskazywanie relacji następstwa czasowego bez konieczności wprowadzania dat kalendarzowych wprost. Formalnie pola danych związane z taką analizą dostępne są w pliku IFC, ale można też operować plikiem IFC i plikiem dodatkowym, także w ujęciu wariantowym na podstawie jednego pliku IFC.</p>	
H4	<p>Integracja jako powiązanie bezpośrednio odpowiednich komponentów 3D z procesami harmonogramu sieciowego jako zaawansowana postać symulacji 4D, gdzie czas jest uzależniony od zasobów przydzielonych procesowi, przy czym należy dodać, iż w systemach tej klasy komponenty 3D przydzielone do procesu są traktowane również jako zasoby, choć są to zasoby szczególnego rodzaju. Na to, aby system można było traktować jako reprezentanta klasy H4, powinien operować funkcjonalnością harmonogramu spełniającą wymagania PN/B w rozumieniu kluczowych pól danych, co do treści, a niekoniecznie formy.</p>	

nie jest tutaj omawiany, gdyż wymaga aparatu matematycznego, którego opis przygotowano do oddzielnej publikacji. Wychodząc naprzeciw uznanym kanonom wypracowanym przez wyżej wymienionych autorów dziedziny, jak i proponowanemu wcześniej podziałowi [32], scharakteryzowano 5 klas integracji – tabela 2.

Tutaj należy dodać, że w powyższym ujęciu pięciu klas integracji samo modelowanie 3D obiektu budowlanego nie jest brane pod uwagę (niezależnie od reprezentowanego przez odnośny model klasy LOD) przy założeniu, że model powstaje wcześniej i zdolny jest do przeprowadzenia symulacji 4D w ujęciu harmonogramu danej klasy LOD. Oznacza to, że według [20]: „każdy element budynku w ujęciu 3D BIM, który nie może być wykonywany w jednym przedziale czasu, musi być podatny na rozbiór na części fizyczne, de facto podelementy”. Jeśli wymóg ten nie jest spełniony, trzeba dysponować systemem posiadającym

funkcjonalność edycji modelu 3D i potrzebie tej sprzyja podejście Open BIM operujące modelem w formacie IFC. Dwa systemy klasy 4D BIM pozwalają na częściową edycję modelu, np. w zakresie podziału elementów jako przejawu przerw roboczych. W projekcie badawczym [31] stosowane są w tym celu tzw. komponenty projektowo-wykonawcze jako podstawa konfigurowania działek roboczych oraz optymalizacji.

7. Podsumowanie

Rozwój metod planowania przedsięwzięć oraz ich implementacja nie odbywają się bez strat i zaburzeń prowadzących do zanikania metod, co dotyczy także oprogramowania jako metod wspomaganych komputerowo. Biorąc pod uwagę analizę zjawiska, zaproponowano 5 poziomów modelowania (D0-D4) jako podstawę doboru metod. Wśród

metod rozróżnia się dokładne i uproszczone i do pierwszych zaliczono dwupunktowy model sieciowy oparty na zasadzie acyklicznego multigrafu (z zaproponowaną nazwą MDM), pozwalający definiować pomiędzy dwoma procesami jednocześnie więcej niż jedno powiązanie logiczne. Powiązania tego rodzaju można poddawać wymianie danych w formacie danych systemu Primavera, a więc XER (*eXport Eagle Ray*), także w wersji XML tego systemu (P6 XML) wykorzystywanych również przez inne programy (szczególnie w przypadku kluczowej klasy D2). Zaproponowano opcje MDM i UDM notacji PDM.

Dla odmiany programy wykorzystujące model sieciowy dwupunktowy w wersji niepełnej, gdyż opartej na zasadzie unigrafu, uznano za zbyt uproszczone (z zaproponowaną nazwą UDM). Reprezentantem w tej kategorii jest m.in. Microsoft Project. Jak wykazuje praktyka autora, sam format zapisu tego programu (MSP XML) może ujmować powiązania wielokrotne, jednakże pod warunkiem niestosowania samego programu Microsoft Project, gdyż ten nie potrafi ich interpretować. Podobna sytuacja występowała w przypadku starszej wersji formatu stosowanego niegdyś w tym programie (MPX), który może wielokrotne powiązania obsługiwać, jednakże obecnie jest on wykorzystywany w innych systemach klasy PMS za wyjątkiem programu Microsoft Project, gdzie został on porzucony.

Metody bardziej zaawansowane oparte na multigrafie cyklicznym są bardziej dokładne, jednakże nie zyskały uznania w praktyce stosowania metod wobec trudności w uzyskaniu rozwiązania dopuszczalnego jako wyrazu spełnienia wielu warunków ograniczających już na etapie tworzenia modelu sieciowego. Nieco odmiennym jakościowo rozwiązaniem są powiązania o charakterze graficznym stosowane w systemie Powerproject, gdyż model nie jest tutaj dwupunktowy, a raczej dowolnie wielopunktowy. Jednak powiązania opisujące tego rodzaju zależności nie są obsługiwane przez żaden inny programy klasy PMS, co musi utrudniać wymianę danych z innymi systemami, jednakże obecnie obsługuje on wymienione formaty obce, w tym Primavera XER.

Z punktu widzenia tematu kluczowego, który stanowią tutaj harmonogramy, zidentyfikowano w skali świata 12 systemów klasy PMS. Wśród nich obecnie już blisko połowa oferuje podejście zintegrowane z 4D BIM w jednym programie. Możliwe jest jednak działanie w myśl przedstawionej klasyfikacji i stosowanie integracji częściowej, która jest mniej kosztowna, a nierzadko bardziej elastyczna. Rozwiązanie racjonalne na obecnym etapie polega na współdzieleniu modelu BIM w wersji IFC pomiędzy programem służącym planowaniu na poziomie harmonogramu ogólnego lub uszczegółowionego z równoległym wizualizowaniem szczegółowym w ujęciu działek roboczych i w tym zakresie zaproponowano 5 klas integracji (H0-H4). Podział harmonizuje z klasami opracowania harmonogramów [32], jak również założeniami planowania kroczącego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamiński K., Metoda wykreslna organizowania pracy zbiorowej w walcowniach, *Przegląd techniczny* 17–20/1909
- [2] Adamiński K., Harmonograf, *Przegląd organizacji* 4/1931, str. 137–139
- [3] Biernacki J., Cyunel B., *Metody sieciowe w budownictwie*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1989
- [4] Bourne L. M., Weaver P., The origins of schedule management: the concepts used in planning, allocating, visualizing and managing time in a project. *Frontiers of Engineering Management* 5(2)2018, str. 150–166
- [5] BS 6079-2: Project management. Part 2: Vocabulary, British Standard Institution 2000
- [6] Clark W., *Wykresy Gantt'a*. INO, Warszawa 1925
- [7] DIN 69900: Projektmanagement – Netzplantechnik. Beschreibungen und Begriffe. Beuth Verlag, 2009
- [8] Dyżewski A., *Doktryna pracy równomiernej w realizacji budowlanej*, PWG, Warszawa, 1949
- [9] Dyżewski A., *Technologia i organizacja budowy*. Wydanie III, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1971
- [10] Fondahl J. W., The history of modern project management. *Precedence diagramming methods: origins and early development*, *Project Management Journal* 18(2)1987, str. 33–36
- [11] Gantt H. L., A graphical daily balance in manufacture, *ASME Transactions* 24/1903, str. 1322–1336
- [12] Hajdu M., *Network Scheduling Techniques for Construction Project Management*, Kluwer-Springer 1997
- [13] Hauswald E., Karol Adamiński, jego twórczość i metody, *Przegląd organizacji* 2/1934, str. 45–49
- [14] Hejducki Z., Łodożyński Ł., Zastosowanie diagramów równoległobokowych w harmonogramowaniu procesów budowlanych, *Przegląd budowlany* 11/2018, str. 41–44
- [15] Jaworski K. M., *Metodologia projektowania realizacji budowy*. Wydanie 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2009
- [16] Kapliński O., praca zbiorowa, *Informatyka stosowana w inżynierii produkcji budowlanej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1996
- [17] Kelley J. E., Walker M. R., *Critical Path Planning and Scheduling*, *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference 1959*, str. 160–173
- [18] Kosieradzka A., Karola Adamińskiego wykreslna metoda racjonalnego organizowania procesu wytwarzania i jej współczesne kontynuacje, *Przegląd organizacji* 5/2018, str. 20–28
- [19] Marsh E. R., The harmonogram: an overlooked method of scheduling work, *Project Management Quarterly* 7(1)1976, str. 21–25
- [20] Moder J. J., Philips C. R., *Project management with CPM and PERT*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1964
- [21] Morris P. W. G., *A Brief History of Project Management*, [w:] *The Oxford Handbook of Project Management 2011*, str. 15–36
- [22] PN/B-07100-07104: *Harmonogramy budowlane (...)*. PKN, 1950
- [23] Przystępski W., *Racjonalizacja budownictwa*, *Przegląd budowlany* 10–11/1929, str. 376–383
- [24] Rowiński L., *Organizacja produkcji budowlanej*, Arkady, Warszawa, 1982
- [25] Roy B., *Theorie des graphes: Contribution de la theorie des graphes a l'etude de certains problemes lineaires*, *Comptes rendus des Seances de l'Academie des Sciences* 4/1959, str. 2437–2449
- [26] Rytel Z., *Harmonogram normatywny*, *Przegląd organizacji* 11/1946, str. 237–238
- [27] Seeling R., *Projektsteuerung im Bauwesen*, B. G. Teubner, Stuttgart, 1996
- [28] Weaver P., Henry L Gantt, 1861–1919, A retrospective view of his work, *PM World Journal* 1(5)2012, str. 1–19
- [29] Wiatr T., *Komputerowo wspomaganie zarządzanie przedsiębiorstwami*, w poradniku: *Kierowanie budową i projektem budowlanym*, Wydawnictwo WEKA, Warszawa, 2002
- [30] Wiatr T., Sikorski A., *Integracja oprogramowania klasy Open BIM w inżynierii projektów budowlanych*, *Biuletyn WAT* 4/2016, str. 177–192
- [31] Wiatr T., *Studium przedsięwzięcia badawczo-dydaktycznego w ujęciu Open BIM PL – problemy i metody*, *Przegląd budowlany* 2/2021, str. 25–36
- [32] Wiatr T., *Modelowanie przedsięwzięć budowlanych w ujęciu 4D/5D BIM i komponentów z klasami LOD*, *Przegląd budowlany* 11–12/2022, str. 90–93