

Most Randselva – zaprojektowany z wykorzystaniem parametrycznego modelowania

tekst: mgr inż. KRZYSZTOF WOJSŁAW, Sweco Norway, BIM Corner, dr hab. inż. MAREK SALAMAK, prof. PŚ, Politechnika Śląska

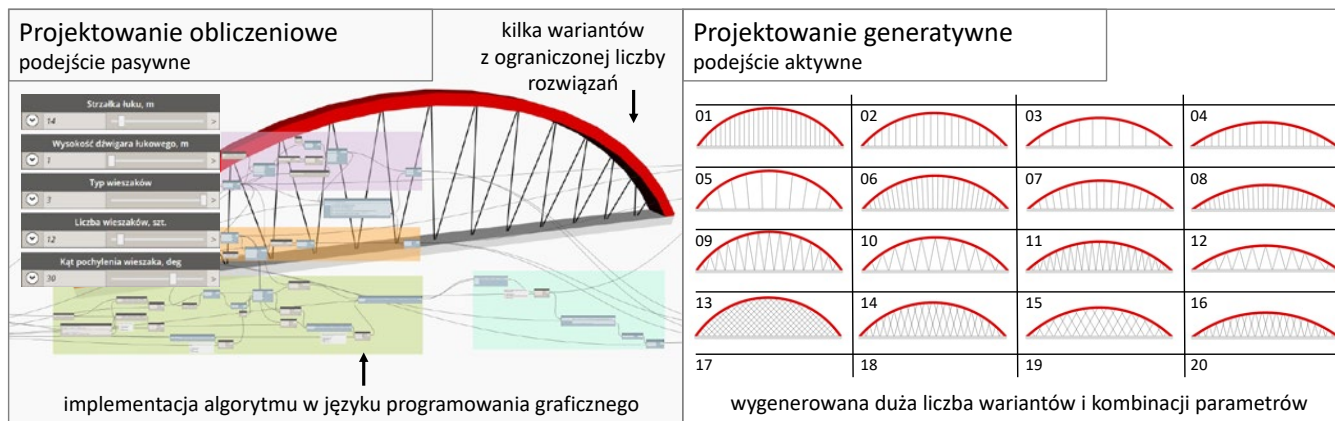
W poprzednim artykule na temat mostu Randselva w Norwegii pisaliśmy o samym moście oraz o metodyce BIM w inżynierii mostowej („NBI” 2021, nr 5, s. 94–95). Dla przypomnienia, chodzi o największy na świecie most, który został zaprojektowany i zrealizowany bez papierowych rysunków. Ta długa na 634 m konstrukcja została zbudowana metodą betonowania wspornikowego i rusztowań przesuwanych z urządzeniem typu MSS (*Movable Scaffolding System*). Otwarcie mostu planowane jest na 2022 r. Natomiast w tym artykule syntetycznie omówimy metodę parametrycznego modelowania konstrukcji mostowych. Należy ona do arsenału narzędzi BIM (*Building Information Modeling*). Bez tego podejścia, które zawiera elementy programowania, nie udałoby się tak skutecznie wyeliminować papierowej dokumentacji.

Nowe podejście do projektowania mostów, które wynika z BIM

Metodyka i narzędzia BIM umożliwiły rozwój zupełnie nowych i bardziej zaawansowanych metod projektowania konstrukcji mostów. Wykorzystuje się w nich nie tylko parametryzację czy statyczne formuły zakodowane w językach programowania, ale wprowadza się wysoki poziom automatyzacji do procesu projektowego, a nawet elementy sztucznej inteligencji i cybernetyki. Zwłaszcza gdy celem projektu nie będzie już tylko sama geometria, choćby najbardziej złożona, ale uzyskanie pewnego optymalnego rozwiązania z punktu widzenia różnych kryteriów, niekoniecznie geometrycznych. Mogą to być np. koszty i czas budowy, trwałość i funkcjonalność, zapotrzebowanie energetyczne lub ślad węglowy. W takich przypadkach konieczne jest przeanalizowanie bardzo dużej liczby wariantów, na które wpływa wiele parametrów, a następnie wybranie spośród nich najlepszego rozwiązania, w określonym stopniu spełniającego założone na wstępie wymagania.

Wraz z opracowaniem technik CAD w projektowaniu pojawiły się też pierwsze próby algorytmizacji i automatyzacji procesu projektowego. Powstanie metodyki BIM i pierwszych narzędzi pozwalających na modelowanie informacji o budowni tylko wzmocniło zainteresowanie tymi technikami projektowania (ryc. 1). Chodzi o nowe podejście do projektowania: parametryczne (*parametric designing*), obliczeniowe (*computational designing*) czy generatywne (*generative designing*).

W tradycyjnym podejściu do projektowania inżynier lub zespół projektowy realizuje swoje pomysły i koncepcje, tworząc model nowego mostu w różnych odwzorowaniach i formach, np. w postaci rysunków, obliczeń, opisów itd. Proces ten podlega wielu ograniczeniom, niepozwalającym na wytworzenie i przeanalizowanie zbyt wielu wariantów. Ograniczenia te to najczęściej reżimy czasowe wynikające z harmonogramu projektu, ale też trudności techniczne, które biorą się np. z braku pełnego dostępu do informacji na danym etapie rozwoju pomysłu.



Ryc. 1. Projektowanie obliczeniowe i generatywne

Najprostszym usprawnieniem, możliwym do zastosowania już nawet w przypadku stosowania technik CAD (a na pewno metodyki BIM), jest podejście algorytmiczne, w którym projektowane obiekty opisuje się za pomocą zestawu parametrów w postaci zmiennych, a nie tylko stałych wartości. Definiując dodatkowo relacje między parametrami, możliwe jest tworzenie bardziej złożonych struktur niż w projektowaniu tradycyjnym. Wciąż jednak mamy do czynienia z podejściem pasywnym, w którym projektant, korzystając z własnego doświadczenia i intuicji, dobiera pasującą mu kombinację parametrów. Ograniczona jest zarówno liczba wszystkich wygenerowanych rozwiązań, jak i możliwych do przeanalizowania wybranych spośród nich wariantów.

Następnym krokiem w kierunku automatyzacji procesu projektowego jest dodatkowe wspomaganie projektowania parametrycznego przez dedykowane oprogramowanie, w którym możliwe jest opisywanie relacji między zdefiniowanymi parametrami oraz tworzenie skryptów kodowanych w sposób tekstowy lub graficzny. Skrypty mogą być wykorzystane do tworzenia zarówno złożonych struktur, jak i większej niż poprzednio liczby możliwych rozwiązań. Ale w dalszym ciągu odbywa się to w sposób pasywny, bo to projektant musi zdecydować o doborze wartości parametrów lub o działaniu kodu. To podejście nazywane jest projektowaniem obliczeniowym (*computational design* lub *computing design*).

Natomiast aktywnym podejściem jest już projektowanie generatywne (*generative design*) i towarzyszące mu wariantowanie (*optioneering*). Jest to w pełni iteracyjny proces projektowania, w którym wykorzystuje się tak elementy projektowania parametrycznego, jak i obliczeniowego, ale z dodatkowym użyciem algorytmów optymalizacyjnych. Projektant ustala przedziały, ograniczenia oraz preferowane wartości wybranych parametrów, a algorytm, badając dużą liczbę możliwych sparametryzowanych rozwiązań, poszukuje tych, które najlepiej spełniają zadane kryteria. Do tego wykorzystywane są często algorytmy genetyczne, naśladujące ewolucyjne podejście natury do projektowania przez zmienność genetyczną i selekcję.

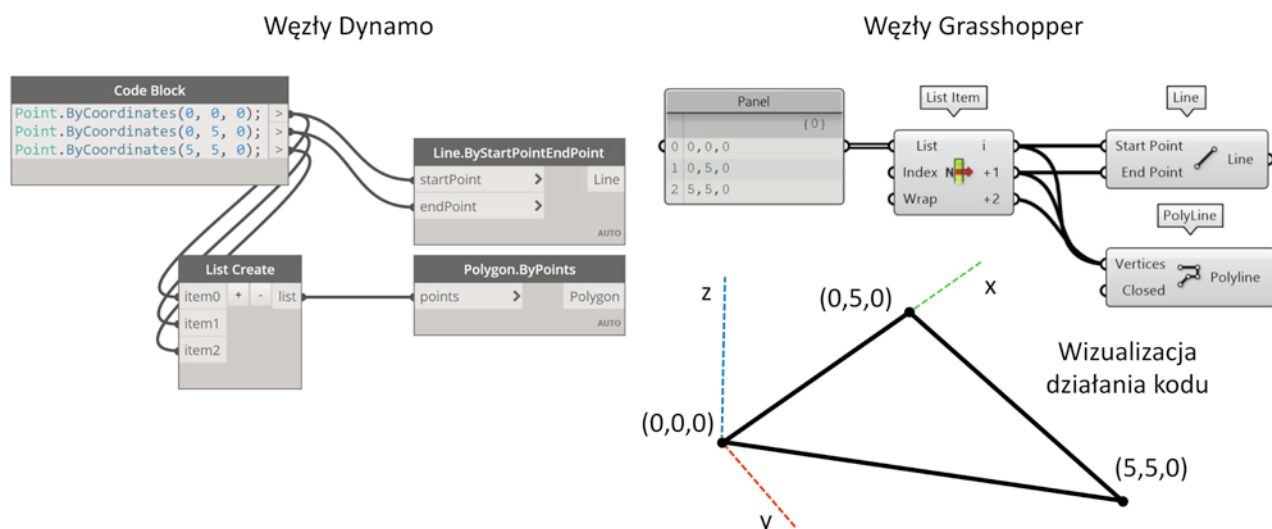
Graficzne języki programowania

Z tym nowym podejściem do projektowania związane są graficzne języki programowania (*Visual Programming Language – VPL*). Są to języki programowania, które pozwalają użytkownikom tworzyć programy przez manipulację elementami programu w sposób graficzny, a nie przez budowanie struktur tekstowych. Umożliwiają programowanie z użyciem pewnych wyrażeń wizualnych oraz przestrzennych aranżacji symboli tekstowych i graficznych, używanych jako elementy składni lub notacji wtórnej.

Praca przy programowaniu polega zwykle na łączeniu ze sobą ramek lub innych obiektów graficznych, które traktowane są jako byty. Połączenia między nimi, zwykle w formie strzałek, linii lub krzywych, reprezentują relacje między ramkami. Wykorzystanie VPL umożliwia łatwiejsze modelowanie skomplikowanych procesów oraz zależności geometrycznych. Ich popularność wynika z faktu, że osoby niemające specjalistycznej wiedzy programistycznej szybciej uczą się tworzenia zaawansowanego oprogramowania, używając do tego celu graficznych symboli, zamiast trudnych do zapamiętania reguł tekstowych i słów kluczowych. Pomagają w tym z pewnością zwiększające się możliwości obliczeniowe komputerów i wygodniejsze interfejsy graficzne.

Szczególnym obszarem stosowania VPL jest architektura i inżynieria. Zagadnienia przestrzenne o wysokim stopniu skomplikowania łatwiej bowiem modelować z użyciem programowania graficznego, tworząc predefiniowane procedury do parametrycznego generowania bardziej złożonych lub powtarzających się struktur. Początkowo rozwój tych narzędzi dotyczył jedynie wąskich specjalizacji głównie z dziedziny elektroniki (MATLAB, Simulink, LabVIEW). Utworzony przez firmę National Instruments LabVIEW jest obecnie jednym z najbardziej rozbudowanych graficznych języków programowania wykorzystywanych w cyfrowym przetwarzaniu sygnałów.

W branży architektonicznej szczególnie popularny jest język Grasshopper 3D, który współpracuje natywnie ze środowiskiem programu Rhinoceros 3D, ale też wieloma innymi narzędziami CAD i BIM. Wykorzystywany jest m.in. do tw. sztuki generatywnej, stanowiącej obecnie jeden z nowych



Ryc. 2. Przykład kodu programu Dynamo i Grasshopper z podglądem wygenerowanych obiektów geometrycznych



Ryc. 3. Parametryczny model geometrii i zbrojenia filarów mostu Randselva

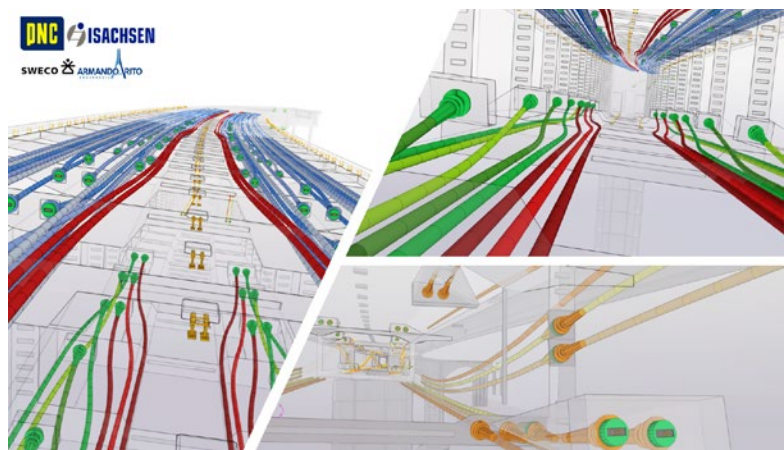
stylów stosowanych w projektowaniu architektonicznym. Innym podobnym przykładem jest rozwijane przez firmę Bentley Systems narzędzie GenerativeComponents. Z kolei Dynamo to otwarty graficzny język programowania firmy Autodesk. Dynamo współpracuje ze środowiskiem BIM, ale może też działać niezależnie. Przykład prostego kodu w różnych językach VPL pokazano na rycinie 2.

Praca przy programowaniu polega na zarządzaniu połączeniami między węzłami programu (ramkami) w celu utworzenia sekwencji zdarzeń prowadzących do wykonania określonego algorytmu. Węzły składają się z portów wejściowych i wyjściowych oraz mają określone dane i metody. Połączenia między węzłami są tworzone za pomocą tzw. przewodów, które sterują przepływem danych w programie. Dla starszych adeptów programowania CAD ciekawą informacją będzie fakt, że Dynamo oparte zostało na języku tekstowym Scheme, który z kolei jest dialektem (odmianą) języka funkcyjnego LISP. Ten język mogą pamiętać użytkownicy wczesnych wersji programu AutoCAD.

Elementy modelowania parametrycznego mostu Randselva

Wykorzystanie parametrycznego modelowania w projekcie mostu Randselva to przedsięwzięcie na skalę światową. Ze względu na rozmiar i poziom skomplikowania konstrukcji do współpracy zostali zaangażowani najlepsi specjaliści w dziedzinie programowania wizualnego z sześciu europejskich krajów. Parametryczne podejście pozwoliło przede wszystkim na wcześniejsze rozpoczęcie prac projektowych. Tworzenie skryptów rozpoczęło się już dwa miesiące wcześniej niż założenia dotyczące wykonania prac projektowych metodą tradycyjną. Algorytmy tworzące geometrię mostu bazowały na zależnościach między poszczególnymi elementami a przestrzenną krzywizną trasy drogi. Geometria ta mogła być modyfikowana na każdym etapie projektu, nawet w fazie modelowania sprzężenia kablami i zbrojenia elementów betonowych (ryc. 3). Przy standardowym podejściu takie zmiany znacząco wpłynęłyby na harmonogram prac, a w niektórych przypadkach spowodowałyby konieczność rozpoczęcia prac projektowych od nowa.

Oczywiście dopasowywanie się całej konstrukcji do kolejnych iteracji geometrii trasy drogi nie jest jedyną zaletą podejścia parametrycznego. Utworzone algorytmy w znaczącym stopniu pomogły usprawnić pracę również przy modelowaniu zbrojenia i sprzężenia skrzynki mostu. W części nawisowej konstrukcji



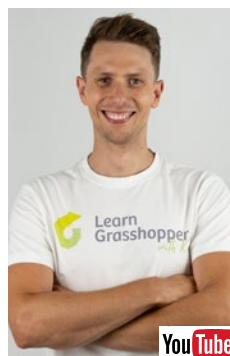
Ryc. 4. Geometria kabli sprężających na moście Randselva

mamy do czynienia z powtarzalnymi segmentami, które są bardzo zbliżone do siebie geometrycznie. Jednak wysokość zbrojenia w każdym z segmentów jest różna, co wynika z parabolicznej zmiany wysokości dźwigara. Wprowadzone zależności między geometrią przekroju a definicją zbrojenia pozwoliły na zautomatyzowanie całego procesu. Na ponad 300 m konstrukcji, czyli na połowie długości całkowitej mostu, zbrojenie zostało wygenerowane w sposób całkowicie automatyczny.

Następnym krokiem było wyeksportowanie geometrii kabli sprężających. Tutaj również parametryczne podejście spełniło swoje zadanie. Eksport 260 kabli o różnej krzywiznie i geometrii zakotwienia został wykonany bezpośrednio z programu obliczeniowego do modelu 3D przez program Grasshopper (ryc. 4). Ta metoda zapewniła zgodność geometrii z modelem obliczeniowym. Dodatkowo model BIM został uzupełniony o identyfikatory poszczególnych kabli wraz z odpowiadającymi siłami zgodnymi z obliczeniami konstrukcji.

Nie ulega wątpliwości, że parametryczne projektowanie to przyszłość inżynierii lądowej. Znajduje ono zastosowanie już nie tylko w architekturze czy przy projektowaniu mostów. Skrypty z powodzeniem wykorzystywane są w wielu różnych dyscyplinach, m.in. w geotechnice, projektach drogowych, kolejowych oraz energetycznych.

Przy tej okazji warto polecić prowadzony na YouTube kanał poświęcony nauce programu Grasshopper (ryc. 5). Znajdziecie tam dużo wiedzy i doświadczenia zdobytego m.in. podczas projektowania mostu Randselva, ale są też



Ryc. 5. Krzysztof Wojsław w YouTube uczy posługiwania się programem Grasshopper

przykłady projektów z niemal całego świata. Tworzymy w ten sposób społeczność inżynierów przyszłości, którzy w swojej pracy wykorzystują projektowanie parametryczne. Regularnie publikujemy praktyczne porady dotyczące zastosowania programu oraz materiały do nauki parametrycznego projektowania. Nasze doświadczenia pokazują, że nauka tworzenia skryptów znacznie zwiększa produktywność w codziennej pracy oraz stanowi bezpieczną inwestycję w karierę i rozwój nowoczesnego inżyniera.

