

Ewolucyjne narzędzia cyfrowe w formowaniu struktur przestrzennych

Digital evolutionary tools and their uses in the process of forming the spatial structures.

Mateusz Zwierzycki
WA Politechnika Poznańska

Słowa kluczowe: architektura, inżynieria, cyfrowe narzędzia ewolucyjne, formowanie, konstrukcje przestrzenne

Keywords: architecture, engineering, digital evolutionary tools, forming, spatial structures

Streszczenie

Szczególnym zainteresowaniem wśród architektów i konstruktorów cieszą się ewolucyjne narzędzia kształtowania form strukturalnych, a zwłaszcza metody nazwanej Evolutionary Structural Optimization (ESO). Metoda ta oparta na procedurach analiz MES różni się od algorytmów optymalizacyjnych, które w swoim podejściu matematycznym znajdują już szerokie zastosowanie w różnorodnych domenach pozainżynierskich. Metoda ESO została opracowana na początku lata 90. ubiegłego wieku, przez Mike Xie i Georga P. Stevena naukowców-inżynierów pracujących w RMIT w Australii. Badania nad przyniosły kolejne jej modyfikacje, takie jak: BESO, AESO, XESO czy też 3D EESO. Przedstawia się te ewolucyjne cyfrowe narzędzie projektowania jak i wyniki ich zastosowania w projektowaniu architektonicznym i inżynierskim. Spektakularnym przykładem jest Narodowe Centrum Konwencji projektu Araty Isozakiego oddane do użytku w 2011.

Abstract

The research of natural structures and mechanisms conducted by multidisciplinary scientists all over the world has provide new ways to define geometry and it's behaviours. Translating this knowledge into digital models driven by notions of morphogenesis, emergency and evolution enables architects to use them in the design process. The article describes a particular method called Evolutionary Structural Optimization (ESO) and a few of it's variations, which incorporates concepts observed in a real-world (contrary to the virtual one) evolution process. This method has become well known after Mike Xie and George P. Steven (both RMIT) have developed it in the early 90's. The basic principle of the ESO is to discretize a volume (or area), define forces acting on it and carry out the FEM analysis. With the data obtained from the analysis, the ESO algorithm performs the deletion stage, which aims to remove the material which is "least useful" in constituting the structure. The ESO method produces an attractive, organic forms which are structurally efficient, consequently soldering the form and structure into unity. This fact led Arata Isozaki & Associates to use the ESO method in the new Qatar National Convention Center project. It has produced an original (even baroque), yet functional form covering the center's main lobby. It is the first time ESO was used in this scale, confirming it's foundings and scalability.

Badania struktur naturalnych, prowadzone na różnych polach nauki, dostarczyły podstaw do definiowania geometrii formy i jej zachowań. Cyfrowa instrumentalizacja procesów ewolucji, morfogenezy i emergencji, wraz z proponowanymi metodami i technikami, daje dziś możliwość zastosowania tych wzorców w projektowaniu architektoniczno-strukturalnym. Stanowi ona kluczową koncepcję istotną tak samo dla teorii, jak i metod projektowania cyfrowego¹. Szczególnym zainteresowaniem wśród architektów i konstruktorów cieszą się ewolucyjne metody kształtowania form strukturalnych. Chodzi przede wszystkim o rozpoznanie i rozszerzenie możliwości stosowania w projektowaniu architektury metody nazwanej (ESO). Metoda ta została opracowana na początku lata 90. ubiegłego wieku, przez Mike Xie i Georga P. Stevena naukowców-inżynierów pracujących w RMIT². Opiera się ona na procedurach analiz MES i różni się od algorytmów optymalizacyjnych, które najczęściej opierając się na podejściu czysto matematycznym znajdowały już szerokie zastosowanie w różnorodnych domenach pozainżynierskich. Badania nad Evolutionary Structural Optimization przyniosły kolejne jej modyfikacje, takie jak: BESO, AESO, XESO czy też 3D EESO.

¹ Por. K. Januszkiewicz, *O projektowaniu architektury w dobie technologii cyfrowych. Stan Aktualny i perspektywy rozwoju*, Oficyna Wydawnicza, Wrocław 2010, 161

² Patrz: M. Xie, G. P. Steven, *A simple evolutionary procedure for structural optimization*, Computers & Structures No. 49, 5/1993, 885-896.

Ewolucyjne narzędzia optymalizacyjne

Evolutionary Structural Optimization (ESO) opiera się na prostym założeniu - dana objętość zostaje zdyskretyzowana, dzięki czemu można przeprowadzać analizy sił oddziałujących na nią, za pomocą metody elementów skończonych (MES). Do objętości przykłada się więc siły, które dana forma będzie miała za zadanie przenieść oraz ustala się punkty podparcia i zaczepienia. Po przeprowadzeniu analizy, usuwa się zbędny materiał wedle ustalonych kryteriów. Następnie powtarza się te dwie czynności (analiza, usuwanie), aż do uzyskania satysfakcjonujących rezultatów - osiągnięcia optimum. Ten prosty proces prowadzi do powstania form znanych nam z Natury, czego przykładem są poniższe ilustracje.

Tak jak w Naturze, forma podlega stopniowym transformacjom - można by powiedzieć "z pokolenia na pokolenie". Ten iteracyjny proces został nazwany ewolucyjnym właśnie z powodu wielu kroków potrzebnych do znalezienia odpowiedniego rozwiązania. Z ontologicznego punktu widzenia nazwa ta nie jest poprawna, ponieważ w metodach komputacyjnych oznacza zastosowanie dyskretnego czasu oraz przede wszystkim populacji różnych od siebie rozwiązań - vide algorytmy genetyczne. Niemniej jednak widok kolejnych kroków optymalizacji przywodzi na myśl schematy ilustrujące adaptację gatunków do zmiennych środowiskowych.

AESO

Additive Evolutionary Structural Optimization (AESO) to jedna z metod optymalizacji, która opiera się na założeniach ESO. Tym co odróżnia AESO od pierwowzoru jest odwrócona logika procesu. Tak jak optymalizacja za pomocą ESO zaczyna się od objętości, by następnie usunąć z niej zbędny materiał, tak AESO bierze początek w zadanych punktach przestrzeni dodając w kolejnych krokach materiał w miejscach gdzie jest on najbardziej potrzebny (zależne od kryterium optymalizacji).

BESO

Metoda AESO okazała się jednak nie w pełni skuteczna, wytwarzając optymalne rozwiązania tylko w niektórych przypadkach (w pozostałych są one prawidłowe, lecz zużycie materiału jest zbyt duże). Dlatego stworzono Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO), metodę łączącą zasady optymalizacji ESO oraz AESO. Połączono w niej możliwość zarówno dodawania jak i usuwania materiału w zależności od przyjętych kryteriów. Opis ulepszonego algorytmu BESO został opublikowany w 2006 przez zespół kierowany przez Mike Xie, z RMIT (jednego z twórców podstaw metody ESO).

3D EESO

Inną techniką dysponuje 3D Extended Evolutionary Structural Optimization (EESO). Jest to rozszerzenie tradycyjnej metody *Evolutionary Structural Optimization* (ESO), która służyła tylko do generowania formy. Forma wynikała z mechanicznych zachowań, które jednocześnie odpowiadały modyfikacji jej kształtu. Obecnie nowa wersja tej metody pozwala generować racjonalne kształty strukturalne. Dzięki wprowadzeniu procesu ewolucyjnego, można bowiem generować trójwymiarowe struktury. Metoda analizy kształtu jest tu oparta na iteracyjnym procesie, którego celem jest osiągnięcie optymalnych rozwiązań strukturalnych. Rozwiązania te dostosować można do ograniczeń, jakie narzuca koncepcja architektoniczna. Komputacji używa się tu tylko do obliczeń zgodności formy strukturalnej z naprężeniami i de-formacją. Ocena jest interpretowana przez wprowadzenie interaktywnej metody analitycznej, która opiera się na topologii, a nie samej geometrii. Wtedy forma wynikowa zachowuje te same relacje topologiczne. Metoda ta jest pomocna w dostosowaniu ewolucyjnego potencjału adaptacyjnego do danego projektu³. Niemniej, projekt konstrukcyjny jest tylko jednym z aspektów różnorodnych relacji, o którym nie może decydować tylko jeden parametr, jakim jest optymalizacja. Struktury przystosowują swoje zdolności przenoszenia obciążeń odpowiednio do rozkładu sił narzuconych przez formę. Stąd struktura wynikowa jest dokładnie określona – są to bardziej zróżnicowane systemy konstrukcyjne niż odmiany zdefiniowanych już ich rodzajów. Mając do dyspozycji cyfrowe narzędzia projektowania można je dziś precyzyjnie definiować.

Położone na przedmieściach miasta Doha w Katarze, Narodowe Centrum Konwencji projektu Araty Isozakiego jest jednym z pierwszych obiektów zrealizowanych w ramach przedsięwzięcia nazwanego *Education City*. Chodzi bowiem o stworzenie dzielnicy edukacji w Doha, na terenie której znajdują się przedstawicielstwa wybranych uczelni z całego świata. Narodowe Centrum Konwencji będzie jakby miejscem wspólnym gdzie odbywać się będą różnego rodzaju konferencje oraz spotkania między-

³ Por. K. Flaga, K. Januszkiewicz, *Wpływ technologii cyfrowych na piękno obiektów mostowych*, w: *Piękno konstrukcji mostowych*, Wydawnictwo PK, Kraków 2012, 176.

narodowe. Na te inwestycje przewidziano 14 km² niemal pustynnego terenu. W 1995 założona została przez szejka Kataru Hamada bin Khalifa Al-Thani fundacja non-profit dla realizacji tego przedsięwzięcia.

Centrum konferencyjne posiada 6 kondygnacji, na 4 z nich znalazło 10 sal wystawowych mogących pomieścić 1 tys. lub 4 tys. osób z w zależności od ich konfiguracji), teatr (2,5 tys. miejsc), 52 pomieszczenia spotkań, 3 audytoria oraz 40 000 m² powierzchni wystawowych mieszczących się w 9 holach. Budynek zdobył certyfikat Leed Gold, między innymi, dzięki zastosowaniu paneli fotowoltaicznych o łącznej powierzchni 3500 m². Dostarczają one 12,5% energii potrzebnej do funkcjonowania obiektu.

Szczególnośc nadaje obiektowi uformowanie struktury nośnej przekrycia. Struktura ta swoim kształtem odwołuje się, jak chce architekt, do rozłożystej głożyny (łac. *Ziziphus spina-christi*), drzewa które w Koranie jest przedstawiane jako symbol boskiej wiedzy. Występuje ono najczęściej na Półwyspie Arabskim i basenie Zatoki Perskiej. W cieniu głożyny odpoczywali strudzeni wędrowcy, drzewo sprzyjało wymianie poglądów i gawędziarstwu. Fundacja stojąca za przedsięwzięciem budowy Narodowego Centrum Konwencji dodaje, że intencją jest stworzenie przyjaznego miejsca dla naukowców - dla nich drzewo to symbol życia na pustyni, a głożyna ze względu na dobroczynne działanie swoich owoców jednocześnie odwołuje do medycyny tradycyjnej. W 2011 odbyła się tu konferencja World Petroleum Congress, natomiast w 2012 United Nations Climate Change Conference - centrum gościło 4 tysiące delegatów, wykorzystując zaledwie 1/3 dostępnej powierzchni. Ikoniczną formę "drzewa" opracowali inżynierowie z Buro Happold wraz architektami z biura projektowego Arata Isozaki & Associates. Do jej wymodelowania użyto ewolucyjnej optymalizacji strukturalnej.

Forma ta została najpierw wprowadzona do projektu konkursowego (2002) przebudowy *Stazione di Santa Maria Novella* we Florencji, największego dworca kolejowego we Włoszech obsługującego 59 mln podróżnych rocznie. Jednak projekt zespołu Isozakiego zdobył drugą nagrodę i nie został zrealizowany (pierwszą nagrodę zdobyli Foster & Partners).

Jedną z pierwszych prób zastosowania metody ESO w projektowaniu architektonicznym był projekt wieloprzestrzennego obiektu kulturalno-turystycznego nazwanego *Gran Coberta* i *Gran Plataforma* w nadmorskiej miejscowości Blanes (Hiszpania, Costa Brava) wykonany w latach 1998-2002. Wygenerowane tu formy o unikatowych kształtach, podobnie jak w Doha, miały stać się ikoną tego kurortu, jednak wskutek cięć budżetowych prace nad projektem zostały wstrzymane.

Dopiero w 2008 gdy przyjęto do realizacji projekt Narodowego Centrum Konwencji w Doha pojawiła się realna szansa zrealizowania nowatorskiej struktury wymodelowanej przez narzędzia oparte na metodzie ESO. Zadaniem struktury przypominającej konary drzewa jest podtrzymywanie płaskiego przekrycia od strony lobby o długości około 250 m i szerokości 110 m znajdującego się wysokość 20 metrów od poziomu jego podłogi. Jest to, jak dotąd, największa budowla na świecie zaprojektowaną przy użyciu metody ewolucyjnej w kształtowaniu formy. Wygenerowanie tak złożonej, dwukrzywiznowej formy przestrzennej za pomocą cyfrowych narzędzi modelowania nie stanowi dziś problemu. Natomiast zrealizowanie jej wiąże się z wieloma komplikacjami wynikającymi ze stopnia złożoności (chodzi tu m. in. o miejsca, w których jedna "gałąź" przechodzi w dwie mniejsze - w takich miejscach pojawiają się powierzchnie o dodatniej oraz ujemnej krzywiznie, co stawia szczególne wymagania konstrukcyjne determinując także materiał jaki może być wykorzystany do jej wytworzenia).

Do opracowania dokumentacji technicznej 3D oraz do przeprowadzenia obliczeń inżynierskich została zatrudniona międzynarodowa pracownia Buro Happold. Firma ta wyznaczyła swoją komórkę SMART (Software Modeling Analysis Research Technologies) do wykonania zadania. Jest to grupa specjalistów w zakresie stosowania cyfrowych metod wspomagania projektowania w architekturze i budownictwie. Pod kierownictwem Shrikanta B. Sharm'ego zespół ten opracował już wiele projektów na całym świecie, by wymienić: Louvre Abu Dhabi (Jean Nouvel), Scunthorpe Sports Academy (Buro Happold), Chiddingstone Castle Orangery Gridshell (Peter Hulbert). Wstępny model cyfrowy sporządzony przez architektów, pracownia SMART musiała wymodelować na nowo za pomocą programu Rhinoceros (Robert McNeel & Associates), który został wybrany ze względu na możliwość modelowania form za pomocą geometrii NURBS oraz ze względu na możliwość tworzenia własnych algorytmów, skryptów i programów zintegrowanych z tym środowiskiem. Słowa Shrikanta B. Sharm'ego: "*Struktury takie jak 'drzewa' są tak niezwykle, że prawdopodobnie potrzeba było do ich wymodelowania osobnego programu CAD zaprojektowanego tylko i wyłącznie do tego*

zadania. Nie jest możliwe użycie standardowego oprogramowania CAD do stworzenia tego wszystkiego. Można by użyć już gotowego interfejsu do wykonania części zadania, lecz w pewnym momencie należy samemu zacząć programować by uzyskać pożądaną efekt" ⁴. (tłum. autor).

Konary drzewa są dwuwarstwowe. Widoczna z zewnątrz srebrna powierzchnia stanowi osłonę wewnętrzną, stalowego, pustego w środku, rdzenia. Użycie dwóch warstw było niezbędne - gdyby miała być to konstrukcja typu *monocoque*, koszty związane z gięciem grubej blachy w dwóch kierunkach uniemożliwiłyby realizację obiektu. Dzięki oddzieleniu rdzenia nośnego od zewnętrznej powłoki wykańczającej, struktura gałęzi mogła zostać uproszczona. Podzielono więc „konary drzew” na stosunkowo proste do wykonania skrzynie stalowe o podstawie ośmiokątą. Stanowiące wspomniany rdzeń. Tak podzieloną konstrukcję przewieziono ze stoczni w Malezji do Doha i na miejscu zmontowano. Kasety zostały tak zaprojektowane, aby ich długość była jak największa (mniej punktów łączenia), przy czym ograniczeniem były warunki transportu - te wymagania zostały uwzględnione już na początku opracowywania dokumentacji. Ze względu na złożoność tego fragmentu budowli wznoszono ją inaczej niż zwykle od dachu do fundamentów stosując systemy prętów ciągnowych firmy Macalloy, aby obniżyć koszty inwestycji.

W przypadku Katarskiego Narodowego Centrum Konwencji w Doha posłużono się ESO do optymalizacji kształtu konstrukcji podpierającej zadaszenie lobby. Skutkiem zastosowania tej metody okazała się forma, której swobodne ukształtowanie wymusiło opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i metod montażu *in situ*. Projektanci świadomie wybrali narzędzia cyfrowe oparte na metodyce ESO. Chodziło bowiem o uzyskanie form podobne wydajnych do tych powstających w Naturze, a ponadto dążono do przetestowania procesu formotwórczego przypominającego ewolucję naturalną. Zasób środków jakimi dysponuje Natura, stanowi dziś nowe źródło inspiracji dla projektantów, którzy chcieliby podążać w kierunku wykorzystania cyfrowych narzędzi projektowania imitujących naturalne procesy formotwórcze.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Flaga, K. Januszkiewicz, *Wpływ technologii cyfrowych na piękno obiektów mostowych*, w: *Piękno konstrukcji mostowych*, Wydawnictwo PK, Kraków 2012.
- [2] K. Januszkiewicz, *O projektowaniu architektury w dobie technologii cyfrowych. Stan Aktualny i perspektywy rozwoju*, Oficyna Wydawnicza, Wrocław 2010.
- [3] Shrikant B. Sharm w: Susan Smith, *Engineering Sidra Trees*, *Architecture Week*, 27. 02. 2008, http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools_1-2.html (z dnia 10.05.2013)
- [4] M. Xie, G. P. Steven, *A simple evolutionary procedure for structural optimization*, *Computers & Structures* No. 49, 5/1993, s. 885-896.

⁴Shrikant B. Sharm w: Susan Smith, *Engineering Sidra Trees*, *Architecture Week*, http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools_1-2.html (z dnia 10.05.2013)