

**Metody numeryczne w modelowaniu struktur przestrzennych. Formy przekrycia.**  
**Numerical methods in modeling of space structures. Forms of roof cover**

Janusz Rębielak

WA Politechnika Krakowska

Słowa kluczowe: technologie cyfrowe, metody numeryczne, modelowanie, struktury przestrzenne, formy przekrycia

**Keywords:** digital technology, numerical methods, modeling, spatial structures, forms of cover**Streszczenie:**

Przedstawiane są przykłady aplikacji języka programowania Formian w procesie projektowania i wyboru typów struktur przestrzennych, a zwłaszcza przekryć dachowych. Uwagę koncentruje się na projektowaniu struktur prętowych zwłaszcza w formowaniu powierzchni sferycznych. Odnosząc się do osiągnięć amerykańskiego konstruktora, filozofa i enwironetalisty Buckminstera Fullera podejmowany jest dialog z narzędziami projektowania opartymi o informatykę. Przedstawiane są osiągnięcia autora artykułu odnośnie stosowania języka projektowania Formian w projektowaniu architektonicznym. Są to projekty architektoniczne, które zawierają omawiane struktury za projektowane przez autora artykułu przy zastosowaniu ponawianej aplikacji języka programowania cyfrowego ukazujące jego możliwości i łatwość posługiwania się i przydatność w pracy architekta.

**Abstract:**

The paper presents examples of applications of numerical models, defined in the programming language Formian in the design processes of selected types of space structures needed for various forms of the roof covers. Application of these numerical models facilitates the co-operation between architects and engineers as well as accelerates the design process of sometimes very complex forms of space structures. An innovative method of secondary grid deformation is described there, which enables very regular subdivisions of the surface area of a sphere, which make it really useful in designing geodesic domes. The article comprises examples of author's projects where the unique structural solutions of the roof covers are applied. The main point of the author's design method is to express the rules of the theory of structures in the shape of the structural system, and to feature it directly in the architectonic form of the building in the same time. There are presented selected examples of building complexes designed by the author in the last decade, that may represent the declared way of shaping of architectonic forms of the objects, which have to meet various requirements of usefulness conditions of useful purposes.

Struktura nośna jest materialnym urzeczywistnieniem formy architektonicznej obiektu budowlanego. Rodzaj systemu konstrukcyjnego, sposób jego zastosowania oraz użyte materiały mają istotny wpływ na wyraz architektoniczny budynków wznoszonych w każdej epoce architektonicznej. Opanowana umiejętność realizacji obiektów najwyższych lub posiadających dachy o największej rozpiętości jest często przyjętym technologicznym miernikiem poziomu cywilizacyjnego osiągniętego przez daną społeczność w badanym okresie. Różnorodne postaci struktur przestrzennych wprowadzane do praktycznych zastosowań, począwszy od połowy ubiegłego wieku, stały się ówczesnym synonimem nowoczesnych rozwiązań w architekturze i budownictwie<sup>1</sup>. W owym czasie znaczącą barierą dla szybszego ich rozpowszechnienia był brak sprawnych i pewnych metod bezpiecznego wymiarowania tych wielokrotnie statycznie niewyznaczalnych obiektów. Kluczowe znaczenie w tym zakresie miały wyniki prac Zygmunta Stanisława Makowskiego (1922-2005), który w połowie lat 60. minionego wieku założył Space Structures Research Centre na University of Surrey w Wielkiej Brytanii. Centrum to pełni od wielu lat funkcję światowego ośrodka koordynującego prace naukowo-badawcze w tej

<sup>1</sup>patrz: S. Z. Makowski, *Analysis, design and construction of double-layer grids*, Applied Science Publishers, London 1981, także: W. Gutkowski (red.), *Obliczenia statyczne przekryć strukturalnych*, Arkady, Warszawa 1981 oraz M. Burt, *Infinite polyhedra lattice (I.P.L) space trusses: morphology, analysis and application*, International Journal of Space Structures, Vol. 11, No. 1&2, 1996, s. 115-126.

dziedzinie. Bezpośrednim następcą Makowskiego na stanowisku dyrektora tego centrum został Hoshyar Nooshin, który jest głównym autorem języka programowania Formian<sup>2</sup> opracowanego dla potrzeb efektywnego projektowania niekiedy wysoce skomplikowanych systemów konstrukcyjnych. W języku tym modele numeryczne mogą być definiowane parametrycznie dzięki czemu są łatwo modyfikowane dla niekiedy zmieniających się nagle potrzeb projektowych. Ponadto ułatwiają one współpracę pomiędzy architektem i konstruktorem oraz innymi uczestnikami procesu projektowego.

Wynikiem długoletniej współpracy ze Space Structures Research Centre, jest to, że w praktyce architektonicznej i działalności naukowej często posługuję się językiem programowania Formian. Zastosowanie tego programu znacznie ułatwia i przyspiesza definiowanie modeli numerycznych nawet dla struktur przestrzennych o skomplikowanym układzie elementów. Naczelną zasadą przyjętą w pracy projektowej jest dążenie do kształtowania formy architektonicznej poprzez wyraźną ekspresję cech systemu konstrukcyjnego zastosowanego do budowy danego obiektu. Podczas procesu kształtowania nowatorskich rodzajów takich systemów muszą być jednak przestrzegane podstawowe prawa mechaniki budowli<sup>3</sup>, a ważnymi inspiracjami są wzory stosownych form strukturalnych występujące w Naturze<sup>4</sup>. Ukazują to przedstawiane tu wybrane prace projektowe wykonane w ostatnich kilku latach. Projekty te, za wyjątkiem koncepcji zespołu centralnego dla Expo 2010 we Wrocławiu, zostały niedawno zrealizowane.

Podstawą teoretyczną języka programowania Formian jest *formex algebra*, której zasady opracował również Hoshyar Nooshin. W *formex algebra* pozycja punktu np. K jest definiowana w przestrzeni dwuwymiarowej formułą matematyczną w postaci następującego zapisu: [1,2]. Powiązania między dwoma punktami definiujące umiejscowienie pojedynczego elementu, np. odcinka JK jest określane zapisem [0,1;1,2]. Położenie zespołu dwóch przykładowych elementów jest zdefiniowane za pomocą formuły podanej na ilustracji (po prawej). Kierunki główne niekoniecznie muszą być tożsame z klasycznymi osiami X, Y oraz Z w kartezjańskim systemie odniesienia, a odległości pomiędzy poszczególnymi liniami „normatowymi” mogą być przez programistę ustalane dowolnie. Te bardzo proste zasady stosują się także do przestrzeni trój- i wielowymiarowej, a po odpowiednim przetworzeniu mogą one stosunkowo łatwo posłużyć do zdefiniowania modelu numerycznego każdej postaci prętowej struktury przestrzennej. Programista może zastosować dowolnie przez siebie wybrany zestaw parametrów umożliwiając tym samym szybką i łatwą modyfikację formy projektowanej bądź analizowanej konstrukcji. Dzięki temu model numeryczny płaskiej postaci dwuwarstwowej struktury prętowej określanej najczęściej mianem „square on square” można bardzo szybko przekształcić na modele numeryczne tego samego rodzaju systemu konstrukcyjnego rozmieszczonego na różnych typach powierzchni o przykładowych formach pokazanych na pozostałych częściach tej ilustracji.

## Kopuły geodezyjne

Kopuły geodezyjne należą do najbardziej efektywnych ekonomicznie i efektownych architektonicznie postaci konstrukcji przestrzennych zbudowanych z prętów tworzących trójkątne siatki sferyczne odznaczające się niewielkim zróżnicowaniem długości odcinków je tworzących. Inicjatorem ich pierwszych zastosowań praktycznych był niemiecki inżynier Walter Bauersfeld (1879-1959) (Planetarium Zeissa, Jena, 1922), a w połowie ubiegłego wieku najbardziej znanym ich propagatorem był amerykański architekt Richard Buckminster Fuller (1895–1983). Fuller nie kontynuował jednak ekspertmentów Bauersfelda tylko stworzył nową geometrię (opartą na liczbach całkowitych) o wszechstronnym zastosowaniu<sup>5</sup>. W oparciu o topologię i geodetykę opracował on aparat obliczeniowy, który

<sup>2</sup>patrz: H. Nooshin, P. Disney, C. Yamamoto, *Formian*, Multi-Science Publishing Co. Ltd., 1993, także: H. Nooshin, P. Disney, *Formex Configuration Processing I*, International Journal of Space Structures, Vol. 15, No 1, 2000, s.1-52.

<sup>3</sup>patrz: T. Kolendowicz, *Mechanika budowli dla architektów*, Arkady, Warszawa, 1993. Allen, także: E., Zalewski, w: *Form and forces. Designing efficient, expressive structures*, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2010.

<sup>4</sup>patrz: O. Frei, *Natürliche Konstruktionen*, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1982.

<sup>5</sup> Fuller sięgnął po koncepcję grafów Eulera z 1736, która dała początek współczesnej topologii. Przypomnieć można, że równanie Eulera jest szczególnym przypadkiem tzw. formuły Schlaefliego dla każdej liczby komórek. Czyli, dla struktur wielokomórkowych liczba 2 w równaniu Eulera zostaje zastąpiona przez C – liczbę komórek. Stąd  $V + F = E + C$ , nawet gdy C jest większe od 2<sup>5</sup>. Taka matematyka, oparta na liczbach całkowitych, jest

umożliwił budowę sferycznych struktur prętowych oraz usystematyzował matematyczny opis *omni-triangulacyjnej* sfery. System ten nazwany geodezyjnym (patent Fullera, 1954) jest fundamentalny dla struktur opartych o *icosahedron* (20-ścian). Pozwala budować obiekty w każdym rozmiarze i gęstości podziałów. Czyni to niewspółmierny wkład w projektowanie lekkiej architektury geodezyjnej<sup>6</sup>. Przez połączenie topologii z geometrią wektorową można by prosto wyjaśniać, demonstrować i przetwarzać zachowania, jakie występują w Naturze. Dzięki takiemu podejściu udało się Fullerowi zredefiniować geometrię kuli. Lekki, sferyczny Pawilon USA (średn. 76,5 m i wys. 61 m) pokryty przez 1900 akrylowych minikopuł, jakby jakaś nowa planeta, dominował nad wystawą światową EXPO'67 w Montrealu. Jest najbardziej znanym dziełem Buckminstera Fullera. Był on nie tylko nowym rozwiązaniem konstrukcyjnym, ale także potwierdzał badania Natury na jej najbardziej mikroskopijnym poziomie (np. cząsteczka węgla C<sub>60</sub> nazwana fullereną). Pawilon USA był potwierdzeniem porządku, który Fuller odnalazł w Naturze, która w każdej sekundzie rozpoczyna tworzenie i budowanie makrostruktur z mikrostruktur<sup>7</sup>.

Matematycznie opracowane wzory siatek strukturalnych mają bowiem swe odpowiedniki w świecie przyrody w postaci przykładowej formy szkieletu radiolarii będącej składnikiem planktonu żyjącego w ciepłych wodach oceanicznych. Te mikroskopijne struktury organiczne odznaczają się najlepszą wydajnością energetyczną potrzebną do ich utworzenia, co zostało odkryte dopiero kilka dekad po pierwszych inżynierskich zastosowaniach kopuł geodezyjnych w architekturze<sup>8</sup>. Atrakcyjna forma takich kopuł wynika z logicznego rozmieszczania elementów składowych, którego matematyczne uzasadnienie jest podświadomie odczytywane przez odbiorcę takiej architektury pochodzącego z każdego kręgu kulturowego świata. Zastosowanie technik komputerowych znacząco ułatwiło i przyspieszyło procesy projektowania oraz wznoszenia tych złożonych konstrukcji przestrzennych. Najczęściej stosowane metody wyznaczania geometrii prętów polegają na projekcji, za pomocą rzutu środkowego, regularnych siatek trójkątnych umieszczonych na ścianach wielościanu podstawowego na współśrodkową kulę. Przyjęty sposób postępowania sprawia, że różnice długości odcinków siatki sferycznej są niekiedy znaczne. Podobny sposób zastosowano w odpowiednich funkcjach języka Formian i między innymi dzięki temu można szybko tworzyć modele numeryczne jedno- i wielowarstwowych kopuł geodezyjnych.

### Metoda deformacji siatki wtórnej

W pierwszych etapach swej pracy naukowej udało się opracować metodę deformacji siatki wtórnej<sup>9</sup>, która umożliwia uzyskiwanie najbardziej regularnych trójkątnych siatek sferycznych. Inspiracją do jej opracowania były obrazy deformacji sieci krystalicznej spowodowane atomem międzywęzłowym oraz luką węzłową w metalu<sup>10</sup>. Istota tej metody polega na odpowiednim zdeformowaniu - zgodnie z zasadami rzutu środkowego – siatki trójkątnej na płaskiej ścianie np. 20-ścianu foremnego, aby po jej

---

łatwa w modelowaniu albo demonstrowaniu. Por. K. Januszkiewicz, *O projektowaniu architektury w dobie narzędzi cyfrowych. Stan aktualny i perspektywy rozwoju*, Oficyna Wydawnicza PWR., Wrocław 2010, s. 120, patrz także: B. R. Fuller, *Synergetics: Explorations in the geometry in thinking*, McMillan, New York, 1975.

<sup>6</sup> W 1960 ukończono w St. Louis budowę pierwszego na świecie ogrodu botanicznego „Climatronic” o pełnej kontroli klimatu. Przekrycie tego obiektu stanowi sfera o średnicy 21 m zaprojektowana przez Fullera.

Wykonano ją z rurowych prętów aluminiowych i paneli z pleksiglasu (Persplex). Innowacją było umieszczenie tych paneli między prętami strukturalnymi tak, że powierzchnia sfery zachowuje ciągłość. Była to najlżejsza zbudowana, do tej pory, struktura osłaniająca 320 m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej. Climatronic uhonorowany został przez Reynolds Memorial Award nagrodą 25 tys. USD za pionierskie wykorzystanie aluminium w architekturze. Gdy w 1947 Fuller opatentował pierwsze rozwiązanie strukturalne sfery, to od tego czasu licencjonował ponad dwieście takich struktur. Współpracując z architektami i firmami inżynierskimi zaprojektował ponad 50 struktur geodezyjnych, realizując przekrycia stadionów, pawilonów ekspozycyjnych, oranżerii i innych obiektów wieloprzestrzennych (np. Multikino z F. L. Wrightem). Rozwijał utopijne wizje o powszechnym zastosowaniu struktur geodezyjnych w różnych warunkach klimatycznych i środowiskowych. Więcej o osiągnięciach Buckminstera Fullera w kontekście technologii cyfrowych patrz: K. Januszkiewicz, op. cit., s. 115-124, 167-193.

<sup>7</sup> por. K. Januszkiewicz, op. cit., s. 119-124.

<sup>8</sup> por. T. Tarnai, *Geodesic domes: natural and man-made*, International Journal of Space Structures, Vol. 11, No. 1&2, 1996, s. 13-25.

<sup>9</sup> por. J. Rębielak, *Wyznaczanie regularnych siatek sferycznych metod deformacji siatki wtórnej*, Inżynieria i Budownictwo, Nr 8, 1983, s. 348-352.

<sup>10</sup> por. W. Gutkowski, op. cit., s. 7

zrzutowaniu z centrum kuli opisanej na nim uzyskać możliwie jak najbardziej regularną trójkątną siatkę sferyczną. Schematy głównych etapów tej metody pokazano na rysunku powyżej. Punkty równego podziału łuków kół wielkich sfery opisanej na wielościanie po ich projekcji rzutem środkowym w kierunku centrum sfery tworzą nowe nieregularne podziały krawędzi tego wielościanu. Z tych punktów prowadzone są odcinki równoległe do podstawy jego trójkątnej ściany i tworzą tam specyficzną formę siatki. Środki ciężkości odpowiednich małych trójkątnych pól wyznaczają położenia węzłów siatki płaskiej, zdeformowanej zasadami rzutu środkowego, która po zrzutowaniu na współśrodkową kulę umożliwia wyznaczanie bardzo regularnej trójkątnej siatki sferycznej. Zróżnicowanie długości odcinków siatki wyznaczanej w ten sposób jest najmniejsze i stosunek ekstremalnych długości jej odcinków dla maksymalnej gęstości siatki osiąga teoretyczną granicę określoną zależnością matematyczną  $2 \times \sin 36^\circ$  czyli około 1,1756<sup>11</sup>. Tą samą granicę osiągają siatki wyznaczone w nieco innej metodzie opracowanej uprzednio niezależnie przez Josepha Clintona<sup>12</sup>.

Łatwość generowania i modyfikacji modeli numerycznych np. kopuł geodezyjnych za pomocą języka programowania Formian ma czasami kluczowe znaczenie gdy należy pilnie przygotować w bardzo krótkim czasie dokumentację projektową jakiegoś złożonego obiektu. Sytuacja taka miała miejsce w przypadku projektu konkursowego na nowy kampus Wyższej Szkoły Gospodarki przy ul. Garbary 2 w Bydgoszczy pod nazwą Centrum Królowej Jadwigi. Ostateczna postać koncepcji projektowej powstała podczas kolejnego pobytu tam autora na około 10 dni przed końcowym terminem nadsyłania prac. Zastosowanie odpowiednich modeli numerycznych umożliwiło zakończenie prac w wymaganym czasie, a omawiany projekt uzyskał pierwszą nagrodę w tym konkursie architektonicznym. Zadanie polegało na zaprojektowaniu najważniejszych obiektów nowoczesnego ośrodka akademickiego, który mógłby być sukcesywnie rozbudowywany w następnych etapach rozwoju Uczelni. Teren planowanej inwestycji znajduje się w dziewiętnastowiecznej zabudowie centrum miasta i przylega bezpośrednio do rzeki Brdy. Skalę trudności powiększał wymóg umieszczenia parkingu na około sto pojazdów w tej bardzo już skondensowanej funkcjonalnie przestrzeni projektowej. Przyjętą wstępnie wizję całego założenia autor zdecydował się zrealizować dopiero po satysfakcjonującym rozwiązaniu parkingu podziemnego i komunikacji całego zespołu uwzględniającego złożone uwarunkowania własnościowe terenu.

W centrum tego założenia znajduje się „Galeria nad Brdą” zaprojektowana w formie jednowarstwowej kopuły geodezyjnej, ma ona objętość ok. 66% pełnej kuli i średnicę podstawy równą 16,80 metra. Ta forma sferyczna nawiązuje w pewnym stopniu do przyjętego nieco wcześniej graficznego logo Wyższej Szkoły Gospodarki. Część edukacyjno-naukowa znajduje się w pobliżu dwóch głównych amfiteatralnych sal wykładowych. W bezpośrednim sąsiedztwie znajdują się – na parterze i na 1-szym piętrze – przestrzenie szerokie na 8,40 m mogące pełnić zarówno funkcje komunikacyjne jak i wystawowe oraz pomocnicze dla organizowanych konferencji, sympozjów lub spotkań. Część administracyjna z odpowiednim zapleczem technicznym oraz szatnią główną jest usytuowana na parterze poniżej poziomu dwóch amfiteatralnych sal wykładowych, z których jedna jest przeznaczona dla 200, a druga dla 250 osób. Wzdłuż zewnętrznego obrysu tej części, od strony ul. Garbary, zaplanowano pomieszczenia Katedr, Zakładów i Pracowni.

W następnej koncepcji projektowej przygotowanej dla ośrodka akademickiego zastosowano także kopułę geodezyjną uformowaną tym razem za pomocą struktury przestrzennej oznaczonej symbolem VA(TH)No2<sup>13</sup>. Została ona opracowana przez autora dla potrzeb konstruowania przekryć prętowo-ciężnowych zdolnych osiągnąć dużą rozpiętość, które mogłyby przyjmować dowolne kształty oraz być rozpięte nad dowolną formą podstawy bez konieczności stosowania obwodowego pierścienia ściskanego (PS). Struktura ta jest utworzona z modułów czworościennych umieszczonych naprze-

<sup>11</sup>por. T. Tarnai, op. cit., s. 13-25, patrz także: T. Penkala, *Zarys krystalografii*, PWN, Warszawa, 1977.

<sup>12</sup>patrz: J. D. Clinton, *Advanced structural geometry studies*, Part 1, Polyhedral subdivision concepts for structural applications, NASA Contractor Report, NASA CR-1734, Washington D.C., 1971.

<sup>13</sup>por. J. Rębielak, *The concept of the triangular-hexagonal tension-strut structure*, IASS-APCS International Symposium on New Perspectives for Shell and Spatial Structures, Taipei, Taiwan, 2003, Extended Abstracts, 184-185, patrz także: J. Rębielak, *Shaping of space structures. Examples of applications of Formian in design of tension-strut systems*, Oficyna Wydawnicza PWR., Wrocław, 2005.

miennie nad każdym trójkątnym polem wokół podstawowej siatki trójkątno-sześciokątnej usytuowanej w warstwie środkowej. Wierzchołki tych modułów są połączone ze sobą za pomocą cięgien, których kierunki zbiegają się w centrum każdego pola sześciokątnej siatki podstawowej. Wstępne sprężenie jest warunkiem koniecznym i może być wprowadzone np. poprzez regulowanie długości wybranych cięgien lub prętów. Sferyczną postać tej struktury, pokazaną na rysunku powyżej, zaplanowano jako zewnętrzną konstrukcję nośną głównego budynku Centrum GEO zlokalizowanego na lewym brzegu Odry naprzeciw kompleksu budynków Politechniki Wrocławskiej przy ul. Wybrzeże Wyspiańskiego we Wrocławiu. W tym zamierzeniu spektakularna kopuła geodezyjna miała być obiektem „flagowym” nowego kampusu GEO mającym pełnić rolę Centrum integracyjnego nie tylko dla środowiska akademickiego Wrocławia. Czterokondygnacyjna przestrzeń wewnętrzna została podzielona na pomieszczenia laboratoryjne przeznaczone dla badań prowadzonych przez różne, głównie interdyscyplinarne zespoły naukowe, a w górnej części przewidziano salę wielofunkcyjną mogącą czasowo pełnić także funkcję Planetarium. Wokół jednokondygnacyjnej części podziemnej zaprojektowano tunel aerodynamiczny. Konstrukcje pomieszczeń wewnątrz kopuły geodezyjnej mogą mieć charakter eksperymentalny i możliwy do wielokrotnej zmiany w trakcie planowanej eksploatacji budynku. Sferyczna postać struktury VA(TH)No2 miała być przedmiotem długotrwałych badań wytrzymałościowo-eksploatacyjnych i stanowić podstawę dla testowania różnych rodzajów ścian osłonowych lub innych typów pokrycia. W intencji projektanta cały obiekt miał być zatem budynkiem prototypowym dla przeprowadzania kompleksowych badań nowatorskich rozwiązań technicznych.

Korzystne własności budowy wewnętrznej struktury VA(TH)No2 skłaniają do jej zastosowań w obiektach zaprojektowanych na siatce trójkątnej lub na jej formach pokrewnych. Kolejny ośrodek akademicki zaplanowano właśnie na takiej siatce i projekt wykonano na międzynarodowy konkurs architektoniczny dotyczący nowej siedziby głównej Bezalel Academy of Arts and Design w bliskim sąsiedztwie starego miasta Jerozolimy, w Izraelu. Ponieważ Jerozolima jest niezmiernie ważnym miastem dla wyznawców trzech głównych religii monoteistycznych dlatego przyjęto założenie, aby w widoku ogólnym tej izraelskiej uczelni pojawiły się w tle symbole graficzne identyfikowane nie tylko z judaizmem lecz także z chrześcijaństwem oraz islamem. Budynek główny kampusu przyjęto lokować na podstawie gwiazdy Dawida, której kształt został zaznaczony innym, ciemniejszym kolorem kamiennej posadzki. Dlatego wybrano siatkę trójkątną jako podstawową dla całego założenia. W bliskim sąsiedztwie terenu i niemal w jego centrum znajduje się katedra prawosławna pod wezwaniem Świętej Trójcy wcinając się półkolem w ten obszar. Na osi tej katedry zaplanowano ułożyć ciemniejsze płyty posadzki kamiennej tworzące kształt krzyża łacińskiego. Półkoliste wcięcie, którego forma jest często kojarzona z islamskim półksiężycem, zaproponowano uwydatnić przez odpowiednie elementy tzw. małej architektury także w ciemniejszym kolorze. Dziedziniec budynku głównego postanowiono przekryć płaskim rodzajem struktury VA(TH)No2, której pola trójkątne są wypełnione panelami stałymi, a pola sześciokątne mogą być czasowo zamykane przez odpowiednio rozmieszczone i ruchome panele trójkątne. Ze względów historycznych i urbanistycznego kontekstu miejsca wysokość zabudowy ograniczono do wielkości + 21,90 m ponad przyległy teren. Podobne czynniki oraz wymogi funkcjonalne ograniczyły maksymalną powierzchnię okien, a kolor wykładziny kamiennej na elewacjach wszystkich zaprojektowanych budynków jest uzyskany przez zastosowanie typowego na tym terenie materiału kamiennego. W strefach wejść do budynku głównego zaplanowano umieszczenie rzeźb w postaci odpowiednich brył tzw. platońskich wyraźnie identyfikujących daną strefę dla użytkownika całej przestrzeni użytkowej.

Dachy płaskie nie zawsze są rozwiązaniem korzystnym dla przekryć o dużych rozpiętościach. Z kolei dogodne pod wieloma względami przekrycie kopułowe realizowane w tzw. tradycyjnych systemach konstrukcyjnych musi posiadać odpowiednią wyniosłość, co skutkuje znaczącymi ograniczeniami natury funkcjonalnej i ekonomicznej jeśli taki dach posiadałby dużą rozpiętość i byłby zlokalizowany w chłodnych lub gorących strefach klimatycznych. Interesującym rozwiązaniem dla takich przekryć jest system *cable dome*, zrealizowany amerykańskiego projektanta Davida Geigera<sup>14</sup>. Schemat tej konstrukcji pokazany na rysunku powyżej jest wizualizacją stosownego modelu numerycznego tego systemu zdefiniowanego także w języku programowania Formian. Istota tego systemu polega na odpowiednim połączeniu stosunkowo krótkich pionowych prętów ściskanych z trzema układami cięgien, a całość systemu musi być wstępnie sprężona i zamocowana w obwodowym

---

<sup>14</sup>patrz: D. H. Geiger, Roof structure, United States Patent, Patent No 4,736,553., 12 April 1988.

pierścieniu ściskanym. Pokrycie jest wykonywane za pomocą stosownych membran umieszczonych w polach pomiędzy cięgnami warstwy górnej zwiększa walory techniczno-użytkowe oraz architektoniczne tych bardzo lekkich systemów nośnych<sup>15</sup>. Należy podkreślić, że za protoplastę tego rodzaju konstrukcji prętowo-cięgnowych uważany jest system konstrukcyjny dachu hali widowiskowo-sportowej „Spodek” w Katowicach, zaprojektowany przez Wacława Zalewskiego<sup>16</sup>.

Odmienny rodzaj systemu prętowo-cięgnowego został opracowany przez autora dla potrzeb konstruowania lekkich przekryć dachowych mogących uzyskać bardzo dużą rozpiętość<sup>17</sup>. System ten nosi nazwę krystalicznej struktury prętowo-cięgnowej i w porównaniu do systemu kopuł Geigera odznacza się większą stabilnością pod działaniem znacznych wartości obciążeń przyłożonych nierównomiernie do węzłów warstwy górnej, oraz może być szybciej i w bardziej prosty sposób montowany na miejscu budowy. Ponadto jedna z jej trzech odmian umożliwia projektowanie takich kopuł posiadających duże otwory centralne. Podstawowa konfiguracja tego systemu była przedmiotem przekształceń, w wyniku których opracowano wiele różnych odmian konstrukcji prętowo-cięgnowych<sup>18</sup>. Jedną z nich, oznaczoną symbolem VU-TensO, zaproponowano jako konstrukcję kopuły o bardzo dużej rozpiętości. Kopuła ta, nazwana Halą 2010, została zaprojektowana jako jeden z dwóch głównych obiektów w autorskiej koncepcji Zespołu Centralnego Expo uprzednio planowanego we Wrocławiu w 2010.

W strukturze tego obiektu głównego zawarto numeryczne informacje zgodnie z ogólnym przesłaniem planowanego Expo dotyczącym globalnej ochrony środowiska naturalnego. Hala 2010 została zaprojektowana jako obiekt wielofunkcyjny, ma formę kopuły o stosunkowo niewielkiej wyniosłości i rozpiętość równą 365,25 m, co odpowiada długości roku kalendarzowego wyrażoną poprzez liczbę dni. W tym zamierzeniu rozpiętość kopuły Hali Stulecia, będąca rekordową w okresie jej wzniesienia, miała być powiększona o rekordową obecnie do pokonania rozpiętość konstrukcji kopuł równą 300 m. Dzięki tym wyjątkowym w skali światowej wymiarom nazwa Wrocław mogła rozpowszechnić się bardzo szybko i szeroko w świadomości społeczeństw wszystkich krajów nie tylko biorących udział w planowanym Expo. Kopuła opiera się na 52 podporach, których liczba jest równa liczbie tygodni w roku, ukształtowanych w postaci pryzmatycznych struktur przestrzennych rozmieszczonych w odstępach co ok. 22,5 m. Wysokość kopuły w górnej krawędzi otworu centralnego wynosi ok. 52 m, a jej krawędzie boczne na obwodzie przekrycia znajdują się na wysokości ok. 22,5 m. Własności konstrukcyjne struktury VU-TensO umożliwiają zaprojektowanie przekrycia kopułowego o tak niewielkiej strzałce. Konstrukcja prętowo-cięgnowa dachu składa się z czterech głównych koncentrycznych pierścieni o odpowiednich formach. Liczba pierścieni odpowiada liczbie głównych pór roku. W centralnej części znajduje się otwór o średnicy ok. 73 m, który może być okresowo zamykany soczewkową strukturą pneumatyczną. Obecność tego otworu nawiązuje do *oculusa* w antycznej, rzymskiej konstrukcji Panteonu, posiadającego rekord największej rozpiętości przekrycia kopułowego czasów starożytnych. Pokrycie dachowe przewidziano w postaci elementów membranowych rozpiętych na odpowiednich łukach pośrednich ze stalowymi ściągamami. Mobilne lekkie kurtyny wykonane w podobnej technologii przewidziano jako boczne ściany osłonowe dla Hali 2010 dzięki czemu mogłaby ona funkcjonować jako obiekt częściowo otwarty lub całkowicie zamknięty. Wysokość usytuowanego obok budynku, nazwanego Bramą Expo, odpowiada długości promienia Hali 2010.

Koncentryczną formę założenia ogólnego z centralnie umieszczoną niewielką kopułą geodezyjną przyjęto jako główną ideę koncepcji architektonicznej projektu konkursowego na Aquapark w Koszalinie. Niestety z niejasnych dla autora względów formalnych projekt ten nie został dopuszczony do konkursu. Ukształtowanie terenu planowanej inwestycji u podnóża Góry Chełmskiej między ulicami: Gdańską, Rolną i Kopernika w Koszalinie skłoniło do przyjęcia takiej ogólnej koncepcji tego kompleksu zawierającego w swym programie funkcjonalno-użytkowym oprócz basenów także m.in.

---

<sup>15</sup>patrz: H. Berger, *Light structures – structures of light: the art and engineering of tensile architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 1996, także: J. Schlaich, R. Bergermann, Leicht weit. Light Structures, Prestel, München-Berlin-London-New York, 2005.

<sup>16</sup>patrz: T. Robbin, *Engineering a new architecture*, Yale University Press, 1996.

<sup>17</sup>por. J. Rębielak, *Cable dome shaped on the ground of the {T – T} double-layer space structure. Example of Formian's application in creation of numerical model of a structure*, w: *Lightweight Structures in Civil Engineering*, Local Seminar of IASS Polish Chapter, Warszawa, 1999, s. 86-87.

<sup>18</sup>por. J. Rębielak, *Shaping of space structures*, op. cit. s. 34.

Day Spa, pomieszczenia kortów tenisowych, sale rekreacyjne i konferencyjne, pokoje hotelowe oraz przestrzenie wymaganego zaplecza technicznego. Centralnie umieszczona i odpowiednio przeszklona kopuła geodezyjna pełni rolę wejścia głównego ułatwiając szybki i sprawny dostęp użytkowników do poszczególnych części składowych tego zwartego kompleksu. Konstrukcję nośną dachu tworzą przenikające się łuki wykonane z drewna klejonego przekrywając całą podstawową powierzchnię Aquaparku i towarzyszących mu pomieszczeń. Przestrzenie poszczególnych części oddzielono od siebie stosownymi przegrodami, których układ może się zmieniać w trakcie eksploatacji obiektu i umożliwiać jego stosunkowo łatwą modyfikację i dostosowanie podziałów wnętrza do aktualnych potrzeb użytkowych.

Podobny zakres tematyczny był przedmiotem zwycięskiej koncepcji programowo-przestrzennej przebudowy istniejących obecnie otwartych basenów miejskich przy ul. Moniuszki 49 w Białogardzie. Opracowano trzy podstawowe warianty koncepcji programowej dla tego mniejszego niż poprzednie zadania inwestycyjnego. W każdym z tych wariantów zastosowano w hali głównej sportowy basen pływacki o wymiarach tzw. olimpijskich (25m x 50m) zawierający 10 torów zawodniczych, brodzik dla dzieci, basen do nauki pływania oraz inne elementy. Przekrycie hali głównej ma odpowiednio ukształtowaną postać walca o rozpiętości 36 m. Na powierzchni walcowej zaprojektowana jest trójkątna siatka prętów wykonanych z drewna klejonego, a sama forma walca w sposób „ukośny” przekrywa przestrzeń główną zespołu basenów. W części bezpośrednio przyległej do tej hali zaproponowano basen do skoków z wieży usytuowany w przestrzeni otoczonej konstrukcją o unikalnej formie zbudowanej na podstawie hiperboloidy jednopowłokowej. Tuż obok znajduje się „wieża” zaprojektowana w postaci wydłużonego ośmiościanu zawierająca klatkę schodową z platformami dostępu do zjeżdżalni. Hala główna ma również podziemne połączenie z przestrzenią osobnego pawilonu tzw. „Oranżerii”, usytuowanej w południowo-wschodniej części działki w miejscu obecnie istniejących osadników. W prezentowanym wariantcie budynek „Oranżerii” ma postać wielościanu określanego mianem anty-pryzmy o podstawie kwadratowej.

Podsumowując przegląd wybranych przykładów można stwierdzić, że dzięki stosowaniu podstawowych zasad mechaniki budowli obowiązujących w całym świecie przyrody można kształtować efektywne ekonomicznie systemy konstrukcyjne umożliwiające nadanie projektowanym obiektom interesujących i unikalnych form architektonicznych. Proces projektowania tych niekiedy złożonych postaci konstrukcji nośnych jest ułatwiony dzięki użyciu odpowiednich modeli numerycznych niezmiernie przydatnych w całym procesie inwestycyjnym. Wizualizacje niektórych prezentowanych tu budynków zostały wykonane na podstawie modeli numerycznych zdefiniowanych w języku programowania Formian w toku realizacji projektu badawczego nr NN527 2464 38 pt. „Metody numeryczne w projektowaniu nowoczesnych form architektonicznych struktur przestrzennych” kierowanego przez autora i finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Narodowe Centrum Nauki.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Berger, *Light structures – structures of light: the art and engineering of tensile architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 1996.
- [2] M. Burt, *Infinite polyhedra lattice (I.P.L) space trusses: morphology, analysis and application*, International Journal of Space Structures, Vol. 11, No. 1&2, 1996, s. 115-126.
- [3] J. D. Clinton, *Advanced structural geometry studies*, Part 1, Polyhedral subdivision concepts for structural applications, NASA Contractor Report, NASA CR-1734, Washington D.C., 1971.
- [4] B. R. Fuller, *Synergetics: Explorations in the geometry in thinking*, McMillan, New York, 1975.
- [5] W. Gutkowski (red.), *Obliczenia statyczne przekryć strukturalnych*, Arkady, Warszawa 1981
- [6] K. Januszkiewicz, *O projektowaniu architektury w dobie narzędzi cyfrowych. Stan aktualny i perspektywy rozwoju*, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2010.
- [7] T. Kolendowicz, *Mechanika budowli dla architektów*, Arkady, Warszawa, 1993.
- [8] S. Z. Makowski, *Analysis, design and construction of double-layer grids*, Applied Science Publishers, London 1981.
- [9] H. Nooshin, P. Disney, C. Yamamoto, *Formian*, Multi-Science Publishing Co. Ltd., 1993.
- [10] H. Nooshin, P. Disney, *Formex Configuration Processing I*, International Journal of Space Structures, Vol. 15, No 1, 2000, s.1-52.
- [11] T. Penkala, *Zarys krystalografii*, PWN, Warszawa, 1977.

- [12] J. Rębielak, *Wyznaczanie regularnych siatek sferycznych metod deformacji siatki wtórnej*, Inżynieria i Budownictwo, Nr 8, 1983, s. 348-352.
- [13] J. Rębielak, *Shaping of space structures. Examples of applications of Formian in design of tension-strut systems*, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław, 2005.
- [14] J. Rębielak, Cable dome shaped on the ground of the {T – T} double-layer space structure. Example of Formian's application in creation of numerical model of a structure, w: *Lightweight Structures in Civil Engineering*, Local Seminar of IASS Polish Chapter, Warszawa, 1999, s. 86-87.
- [15] T. Robbin, *Engineering a new architecture*, Yale University Press, 1996.
- [16] J. Schlaich, R. Bergermann, *Leicht weit. Light Structures*, Prestel, München-Berlin-London-New York, 2005.
- [16] T. Tarnai, Geodesic domes: natural and man-made, *International Journal of Space Structures*, Vol. 11, No. 1&2, 1996, s. 13-25.
- [17] E. Zalewski, w: *Form and forces. Designing efficient, expressive structures*, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2010.
- [18] M. Burt, *Infinite polyhedra lattice (I.P.L) space trusses: morphology, analysis and application*, *International Journal of Space Structures*, Vol. 11, No. 1&2, 1996, s. 115-126.