

Marta Tobolczyk

Akademia Finansów i Biznesu Vistula – Warszawa

WZORCE HARMONII OPARTEJ NA GEOMETRIACH NIEUKLIDESOWYCH W ARCHITEKTURZE WSPÓŁCZESNEJ (CZĘŚĆ II)

Streszczenie

Tradycja ładu przestrzennego w architekturze opartego na proporcjach matematycznych i kompozycji prostych brył geometrycznych wyrażona na piśmie sięga starożytności. Geometria euklidesowa, poszerzona w XVII wieku przez francuskiego matematyka i filozofa Kartezjusza (fr. René Descartes), aż do połowy XX wieku stanowiła nienaruszalną bazę architektonicznych poszukiwań twórczych w zakresie geometrii. Jednak poczucie ogromnego niewykorzystanego potencjału tkwiącego w nowych technologiach budowania bazujących na żelbecie i stali skłoniło niektórych twórców architektury do poszukiwania nowych środków wyrazu wykraczających poza ograniczenia klasycznej geometrii. Przełom, dokonany w latach 50. i 60. poprzedniego stulecia, rozpoczął nową erę architektury opartej na geometriach nieeuklidesowych. W artykule przedstawiono osiągnięcia takich pionierów, jak amerykański architekt pochodzenia fińskiego Eero Saarinen, Duńczyk Jørn Utzon i oraz aktualnie działających architektów duńskich (Kristoffer Tejlgaard and Benny Jepsen), którzy przyczynili się do wypracowania nowych wzorców dynamicznej ekspresji we współczesnej architekturze. Celem artykułu badawczego jest prezentacja indywidualnych osiągnięć na tym polu wymienionych powyżej zasłużonych twórców. Przeprowadzona analiza i studium przypadków wykazują śmiałość nowoczesnych kompozycji architektonicznych opartych na układach nieliniowych w stosunku do tradycyjnej modernistycznej architektury. Praca ma wartość edukacyjną i praktyczną, stanowiąc źródło wiedzy i inspiracji dla współczesnej twórczości architektonicznej.

Słowa kluczowe: architektura organiczna, harmonia oparta na geometrii, geometria sferyczna w architekturze, geometria eliptyczne w architekturze.

Figury i bryły geometryczne jako podstawa ładu w architekturze

Europejska tradycja harmonii w architekturze opartej na zasadach matematyki i geometrii wywodzi się z filozofii oraz podstaw nauk wypracowanych w starożytnej Grecji. To przekonanie Greków, że wszechświat zbudowany jest z prostych brył geometrycznych, prowadziło do zastosowania podobnych zasad organizacji przestrzeni w projektowaniu. W swoich badaniach nad istotą bytu i strukturą Uniwersum Pitagorejczycy podnieśli do rangi kulturowej znaczenie miary, proporcji i brył geometrycznych. Platon, dzieląc część poglądów Pitagorejczyków, stworzył wizję struktury materii świata opartej na idealnych bryłach geometrycznych, które określa się jako platońskie. Filozof potwierdził istnienie ograniczonej liczby pięciu brył doskonałych, w których ściany są przystającymi wielokątami foremnymi,

w każdym ich wierzchołku zbiega się jednakowa liczba ścian oraz są one bryłami wypukłymi¹. Cztery z tych brył miały ściany zbudowane z dwóch rodzajów trójkątów prostokątnych. Wielościanom foremnym, mającym proporcje najdoskonalsze przyznał Platon rolę tak szczególną, uznając, że w dziele budowy świata najwyższy stwórca (Demiurg) musiał się kierować ich doskonałym pięknem. Te same proporcje i kształty zalecał Platon w sztuce, a co za tym idzie również w sztuce budowania. Priorytet dawał zwłaszcza trójkątom równobocznym i pitagorejskim, które uważał za elementy strukturalne brył doskonałych, takich jak sześcian. Za doskonałą bryłę uznawał też kulę, którą z racji tej doskonałości wybrał Bóg nadając formę światu (Platon 1986, s. 40). Nie będzie przesadą stwierdzenie, że to Platon stworzył fundament estetyki opartej na geometrii, uznawany w cywilizacji Zachodu od czasów starożytnych po współczesność. Dziełem Euklidesa była aksjomatyzacja geometrii na płaszczyźnie.

Dla inżynierów budownictwa jest oczywiste, że zastosowanie w architekturze układów geometrycznych nie tylko ułatwia wytyczenie planu obiektów w terenie, ale również określa pracę ustrojów konstrukcyjnych w zakresie przenoszenia obciążeń na fundamenty. Właściwa zrównoważona geometria jest gwarantem stabilności całości struktury architektonicznej.

Geometrie nieeuklidesowe: sferyczna i eliptyczna

Gdy w erze komputeryzacji XX wieku stało się możliwe tworzenie bardziej złożonych układów przestrzennych niż spełniające aksjomaty Euklidesa, coraz większe znaczenie zyskały tzw. geometrie nieeuklidesowe. Nie ma jednej ścisłej definicji geometrii nieeuklidesowych. Zarówno *Encyklopedia PWN*, jak i *Encyclopaedia Britannica* pojęciem tym obejmuje geometrie różne od geometrii euklidesowej, co nie oznacza, że wszystkie nieokreślone bliżej trójwymiarowe kształty można uznać za przykłady geometrii nieeuklidesowej. Akceptowalnymi typami takich geometrii są jedynie: geometria hiperboliczna (określana również jako geometria siodła lub geometria Bolyaia-Łobaczewskiego), geometria eliptyczna, sferyczna oraz geometria Riemanna będąca uogólnieniem powyższych. Są to geometrie przestrzeni o krzywiznie odpowiednio ujemnej i dodatniej, które łączy fakt, że nie jest w nich spełniony piąty aksjomat Euklidesa. Mimo iż są one różne od geometrii euklidesowej, są do niej zbliżone. Szersze pojęcie geometrii nieeuklidesowej ustalono przy założeniu, że jest to geometria, która nie spełnia co najmniej jednego z aksjomatów geometrii euklidesowej.

W części I tego artykułu (Tobolczyk 2019) omówiono zastosowania geometrii hiperbolicznej w architekturze. W części II przedstawione zostaną obiekty oparte na geometrii sferycznej i eliptycznej.

¹ Platon opisuje w dialogu *Timajosa* jedynie cztery z nich (Timajos 1986, s. 70-74), nie wspomina jeszcze o dwunastościanie odkrytym dopiero przez Teajtetosa (ucznia Platona). (*Encyklopedia PWN*, hasło *Teajtetos*).

Geometria sferyczna jest działem geometrii zajmującym się badaniem *własności figur położonych na powierzchni kuli* (z greckiego σφαῖρα – *sphaira*) – podobnie jak planimetria, która zajmuje się badaniem własności figur położonych na płaszczyźnie.

Wielkie koła na powierzchni kuli uzyskane w efekcie przecięcia kuli płaszczyzną, są odpowiednikami prostych na płaszczyźnie; przez 2 punkty na kuli nie będącymi końcami jej średnicy przechodzi tylko 1 koło wielkie, analogicznie do płaszczyzny, na której 2 punkty wyznaczają tylko 1 prostą; podstawowymi figurami w geometrii sferycznej są dwukąty sferyczne, trójkąty sferyczne, wielokąty sferyczne, tj. wielokąty położone na kuli, których bokami są łuki kół wielkich mniejsze od półokręgu; zależności między bokami i kątami trójkątów sferycznych bada — na podobieństwo trygonometrii płaskiej — tzw. trygonometria sferyczna (*Encyklopedia PWN*)

Geometria eliptyczna – to, wg *Encyklopedii PWN*, szczególny przypadek geometrii Riemanna² dla stałej i dodatniej krzywizny. Od geometrii sferycznej różni się tym, że każde dwa punkty jednoznacznie wyznaczają prostą, podczas gdy w geometrii sferycznej para punktów antypodycznych nie ma tej właściwości.

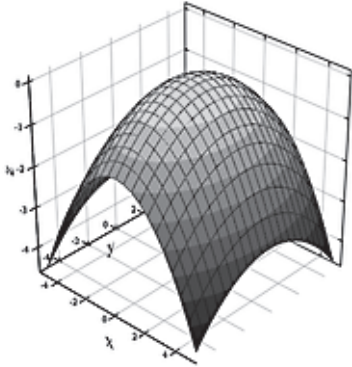
Geometrie nieeuklidesowe w architekturze; zastosowanie geometrii eliptycznej

W praktyce geometria eliptyczna i geometria sferyczna stosowane były już w prehistorii, kiedy człowiek posiadał umiejętność budowy kopuły i sklepienia kolebkowego, na tysiąclecia przed traktatem Euklidesa. Chociaż w teorii temat geometrii nieeuklidesowych budził zainteresowanie matematyków już w XVII wieku, początki ich zastosowania w architekturze wiążą się z wprowadzaniem nowych technologii przekrywania obiektów wielkoprzestrzennych cienkimi powłokami żelbetowymi, co miało miejsce w Europie, m.in. w Niemczech i Hiszpanii w latach 20. i 30. XX wieku, najczęściej z wykorzystaniem geometrii paraboloidy hiperbolicznej, sferycznej i eliptycznej. Wybitne osiągnięcia w tej dziedzinie to System Zeiss Dywidag – powłoka żelbetowa o grubości zaledwie 1,5-2,5 cm w kształcie paraboloidy eliptycznej skonstruowana na zlecenie Carl Zeiss oraz kopuła hali targowej w Algeciras wzniesionej w 1933 roku (inżynier Eduardo Torroja). Do zastosowania na szerszą skalę przekryć powłokowych opartych na żelbecie, żeliwie i stali, doszło jednak dopiero w latach 50. i 70. XX wieku. Wybitnymi pionierami w tej dziedzinie byli Amerykanin fińskiego pochodzenia Eero Saarinen oraz Duńczyk Jørn Utzon (1918-2008).

² Georg F.B. Riemann (1826-1866) – niemiecki matematyk, i filozof przyrody, profesor Uniwersytetu w Getyndze. Jego wielowymiarowa geometria dała matematyczne podstawy ogólnej teorii względności. Zainicjował systematykę geometrii nieeuklidesowych. „Geometrie Riemanna” to wielowymiarowe uogólnienia klasycznej geometrii różniczkowej na dwuwymiarowych powierzchniach (zapoczątkowanej przez C.F. Gaussa), właśc. teoria przestrzeni Riemanna, stworzona w 1854 roku przez B. Riemanna (*Encyklopedia PWN*).

Ilustracja 1a

**Paraboloida eliptyczna
dla $a=2$, $b=3$,
na obszarze $[-5,5] \times [-5,5]$**



Źródło: Wikipedia, domena publiczna.

Ilustracja 1b

**Powłoka żelbetowa w kształcie paraboloidy
eliptycznej w Wiesbaden, Hesse w Niemczech
1931 roku. Proj. Franz Dischinger**



Źródło: www7.

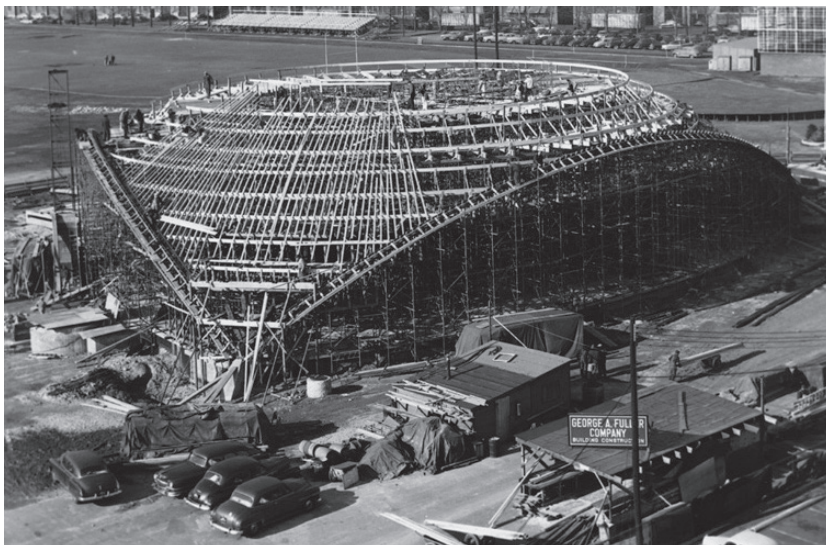
Przykłady architektury opartej na geometrii eliptycznej

Audytorium im. S. Kresge (Kresge Auditorium, 1953-1956)

Gmach zaprojektowany przez architekta Eero Saarineną był eksperymentem zarówno w zakresie formy architektonicznej, jak i technologii budowlanej godnym miejsca swojego powstania – na kampusie Massachusetts Institute of Technology w Cambridge. MIT to uczelnia, która swoją sławę zawdzięcza wysokiemu poziomowi edukacji w zakresie technologii i innowacji. Wieloprzestrzenna hala Kresge, która miała stać się istotnym centrum społeczno-kulturalnym jednoczącym społeczność uniwersytecką MIT, jest dziś uznawana za jedno z najwybitniejszych osiągnięć inżynierskich Stanów Zjednoczonych połowy XX wieku. Saarinen zaprojektował Kresge Auditorium jako część zespołu dwóch obiektów obejmującego również centralną kaplicę MIT. Audytorium, ukończone w 1956 roku, przekryte było cienką powłoką żelbetową stanowiącą wycinek 1/8 powierzchni kuli. Innowacyjna technologia budowy hali o wysokości 15 m, okazała się wyjątkowo trudnym wyzwaniem. W trakcie budowy, a nawet później, podczas eksploatacji, wymagała wielu zmian konstrukcji zapewniających stabilność. Pierwotny projekt przewidywał oparcie całej konstrukcji dachu jedynie na trzech głównych podporach. Jednak odchylenie belek krawędziowych było większe niż przewidywano i wymagało dodania strukturalnych pionowych żeber konstrukcyjnych za ścianą kurtynową.

Ilustracja 2

**Kresge Auditorium w Cambridge, Mass, USA; projekt: Eero Saarinen (1953-1956).
Przykład zastosowania paraboloidy eliptycznej. Hala w trakcie budowy**



Źródło: archiwum MIT Museum.

Ilustracja 3

Auditorium im. S. Kresge na kampusie MIT, Cambridge, Mass, USA; widok w 2017 roku



Źródło: Wikipedia, CC BY-SA 4,0, autor: Beyond My Ken, 2017.

W efekcie uszkodzeń również pokrycie hali zmieniano kilkakrotnie podczas budowy, jak również później w czasie eksploatacji obiektu. Kopuła waży tylko 1100 ton i jest obecnie pokryta płytkami miedzianymi. Pierwotnie dach przykrywała gładka jasna powłoka z *ora stone* – łupków wapiennych łączonych ciekłym akrylowym spoiwem polimerowym, co dawało efekt nieskazitelnej, gładkiej białej powłoki. To nietrwałe, podlegające ruchom termicznym pokrycie zastąpiono płytami blachy ołowianej przymocowanej łącznikami ze stali nierdzewnej, aby w końcu wybrać sprawdzone historycznie pokrycie miedziane. Kopuła osadzona na okrągłej platformie z czerwonej cegły, przykrywa hall, salę koncertową dla 1226 widzów oraz kameralny teatr dla 204 osób, sale prób, garderoby, biura i toalety.

Terminal linii lotniczych TWA (1956-1962) na lotnisku JFK w Nowym Jorku

Eero Saarinen kontynuował pomysł zastosowania cienkościennej powłoki żelbetowej opartej na geometrii elipsoidalnej w kolejnym swoim projekcie – terminalu linii lotniczych TWA na lotnisku JFK w Nowym Jorku. Zastanawiał się, jak wyrazić dramaturgię i cud podróży lotniczych” w dynamicznej formie budynku wykonanym z betonu³ (Eero Saarinen & Assoc MS 593).

Ilustracja 4

Terminal TWA na lotnisku JFK w Nowym Jorku. Zastosowanie geometrii eliptycznej
4a. Pierwotny model Saarinen z jednorodną falującą powłoką dachu; 4b. Podział dachu na segmenty w zbudowanym obiekcie



Źródło: www5.

Zdjęcie: Agata Tobolczyk, 2014.

³ *How to express the drama and wonder of air travel through a dynamic building form made of concrete* – wypowiedź Eero Saarinen w rozmowie z Andersonem.

Architekt, nie do końca usatysfakcjonowany swoją koncepcją jednoprzestrzennej powłoki widocznej na modelu (ilustracja 4a), konsultował projekt konstrukcji z firmą inżynierską Ammann & Whitney. W rezultacie rozmów z inżynierem Boydem G. Andersonem, opływowy kształt całego budynku przyjął rzeźbiarską formę końcową przypominającą wznoszącego się do lotu ptaka, zgodną z poetycką wizją Saarinen. Efekt ten został uzyskany przez przykrycie całego obiektu czterema łupinami, każda na planie trapezoidu, wspartymi na ukośnych słupach w kształcie litery Y. Znaczny wysięg każdego skrzydła opartego jedynie w dwóch punktach podtrzymujących słupów, był ogromnym wyzwaniem konstrukcyjnym, rozwiązaniem przez głębokie betonowe palowanie pod fundamentami oraz silne ściągi stężające między podporami. Dodatkowo zaistniała konieczność pogrubienia krawędzi na styku poszczególnych powłok, osiagających w centralnym punkcie zetknięcia wszystkich czterech powłok nawet 1 m grubości (Mainstone 1998, s. 245). Obliczenia konstrukcyjne wykonano przy pomocy elektronicznych maszyn liczących, pierwszych gigantycznych komputerów. Wnętrze, zgodnie z intencją Saarinen, było organicznym zespoleniem wszystkich elementów konstrukcyjnych, przestrzennych i wyposażenia.

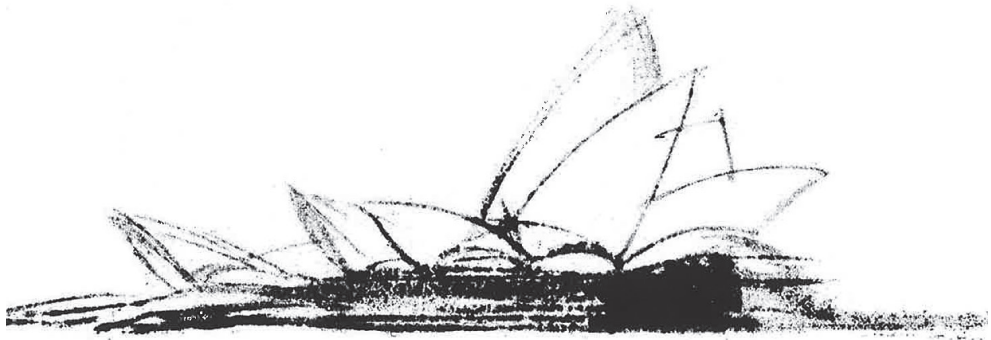
Zastosowanie geometrii sferycznej w architekturze

Opera w Sydney (1955-1973)

Sztandarowym przykładem zastosowania geometrii sferycznej jest oczywiście gmach opery w Sydney (1955-1973) zaprojektowanej przez Jørna Utzona (1918-2008). Nadesłana przez niego w 1955 r. praca konkursowa nie zapowiadała jeszcze rozwiązania o tak silnie zdefiniowanej geometrii. Ilustruje to choćby szkic z 1957 roku (ilustracja 5).

Ilustracja 5

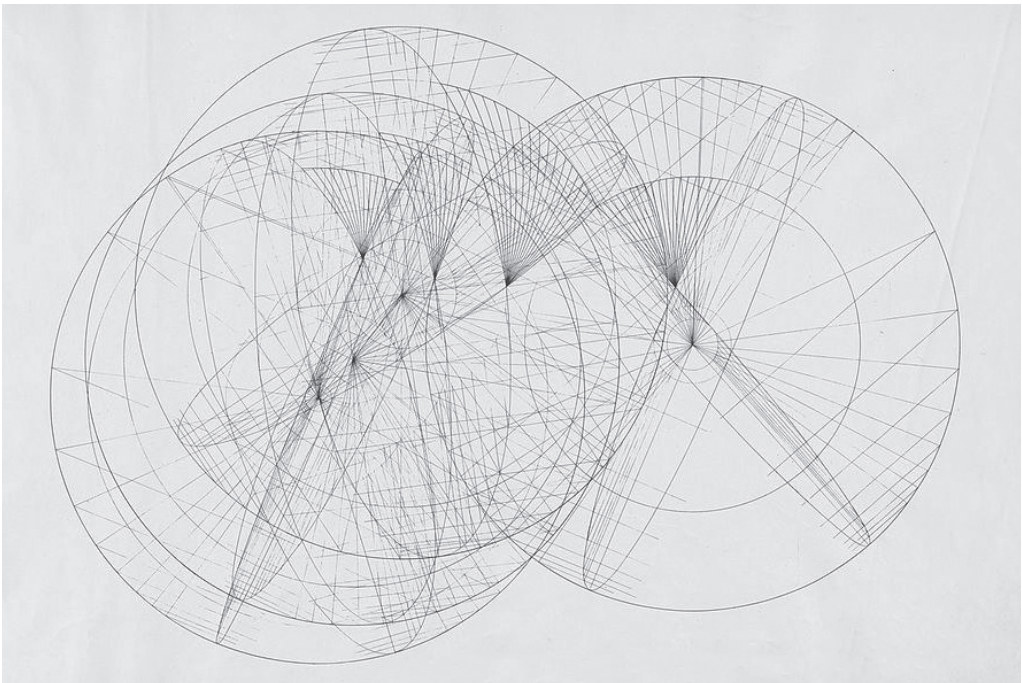
Wczesny szkic Jørna Utzona z tzw. Księgi Czerwonej z 1957 roku przedstawiający bryłę gmachu opery w Sydney z dachami w formie żagli o nieokreślonej geometrii



Właściwie przesłana praca konkursowa Utzona była zbiorem wstępnych szkiców. Jednak uczestnictwo w sędziu konkursowym Eero Saarinen, który sam stosował organiczne formy architektury z zastosowaniem żelbetowych przekryć powłok, przesądziło o zwycięstwie Utzona w konkursie. Po upływie czterech lat władze miasta niecierpliwiły się chcąc przystąpić do budowy, jednak sam autor nie miał jeszcze pomysłu na rozwiązanie konstrukcji. Powołana do konsultacji słynna firma brytyjska Ove Arup and Partners zdecydowała się przedstawić ofertę wykonawczą bez odpowiednich rysunków roboczych i prace budowlane ruszyły w 1959 roku.

Ilustracja 6

Geometryczna konstrukcja ukazująca sposób kształtowania powłok dachu nad głównym halle, zaczerpnięta z tzw. Żółtej Księgi opracowanej przez Jørna Utzona w 1962 roku obejmującej szkice i plany dla budowy opery w Sydney



Źródło: Wikimedia Commons, CCBY 2.0. Przeniesione z Flickr przez Oxymana.

Dopiero w 1961 roku Utzon w końcu zdecydował się odstąpić od niezdefiniowanych do końca eliptycznych i parabolicznych powłok i wykorzystać zalety geometrii sferycznej. Na pomysł podziału bryły budynku na trójkąty sferyczne miał wpasć podczas obierania i jedze-

nia pomarańczy. W rezultacie zastosowania geometrii sferycznej oraz konieczności przeciwdziałania silnym wiatrom, bryłę budynku formuje dziś 10 zakrzywionych paneli żelbetowych o wysokości ok. 60 m wspartych na żelbetowych żebrach, ustawionych w dwóch rzędach jedno za drugim. Dzięki metodzie ścisłego wykorzystania wycinków kuli, uzyskano efekt samopodobieństwa, co umożliwiło przygotowanie prefabrykowanych powtarzalnych elementów konstrukcji. Profile grzbietów dachowych stały się coraz bardziej zaostrzone; forma powłoki końcowej nie była już nadwieszona jak urwisko nad morzem. Te wyższe profile pozwoliły również na lepsze wykorzystanie zaplecza wież scenicznych i przestrzeni audytoriów.

Ilustracja 7

Widok opery w Sydney przedstawiający bryłę gmachu z jasnymi dachami w formie żagli pięknie kontrastujące z błękitem wody i nieba



Zdjęcie: Janusz Kozakiewicz, 2011.

Duży rozmiar powłok zadania opery w Sydney oznaczał, że będą musiały być budowane etapami lub składane z części. Wymogi ekonomiczne i czasowe wskazywały na potrzebę szybkiego wykonawstwa. Powłoka paraboliczna lub eliptyczna nie spełniłaby tych oczekiwań, ponieważ następnie każde żebro byłoby różnie zakrzywione.

Pawilon dla publicznych spotkań w Allinge, Dania (2012)

Młodzi architekci duńscy Kristoffer Tejlgaard i Benny Jepsen zaprezentowali w 2012 roku oryginalny projekt tymczasowego pawilonu dla różnego rodzaju zgromadzeń i spotkań ludzi służącego szeroko pojętej integracji społecznej. Przez jego budowę autorzy zrealizowali część szerszego programu działania na rzecz stworzenia funkcjonalnej, estetycznej i zrównoważonej architektury z uczciwymi i racjonalnymi zasadami budowy oraz naturalną integracją z naturą. Projekt miał być alternatywą dla masowej prefabrykacji oraz przemysłowych metod budowy, a także przykładem ekologicznej architektury przyjaznej ludziom i środowisku, ekonomicznie wykorzystującej dostępne zasoby i recykling.

Jeśli chodzi o geometrię, to za punkt wyjścia przyjęli model przestrzenny rozwinięty w latach 40. XX wieku przez amerykańskiego konstruktora i architekta Richarda Fullera, nazwanego przez niego kopułą geodezyjną. Kopuła ta jest wielościanem, który odwzorowuje powierzchnię kuli. W kopule geodezyjnej najmniejszym stosowanym elementem geometrycznym jest najczęściej trójkąt równoramienny zbliżony do równobocznego, będącego najsztymniejszym wielokątem (www6).

Ilustracja 8

Projekt pawilonu dla spotkań w Allinge, Dania, autorstwa K. Tejlgaarda i B. Jepsena (2012)



Zdjęcie: www4, autor: Kristoffer Tejlgaard.

Nie powinno dziwić, że duńscy architekci nazwali formę kopuły geodezyjnej „świętą geometrią” (www5). Geometryczny kształt kopuły geodezyjnej stosowany jest bowiem w architekturze jako atrakcyjne, wytrzymałe i samonośne (tzn. niewymagające wewnętrznych podpór) przykrycie dużych powierzchni. Autorzy postanowili podjąć się zdekonstruowania tej „świętej geometrii”, w sposób respektujący właściwości kopuły geodezyjnej. W efekcie podziałów i skalowań wzbogacili formę projektowanego pawilonu i uzyskali pewne rozczłonkowanie umożliwiające spełnianie funkcji miejsca spotkań, zachowując jednak kolisty kształt zasadniczego trzemu budowli. Dzieląc kopułę, stworzyli nisze wewnętrzne, które stanowiły ramy dla różnych funkcji wewnętrznych i oświetlenia pośredniego. Przyjęli zasadę, że zakrzywione powierzchnie zostały zamknięte, a prostopadłe powierzchnie pozostały przezroczyste, pozwalając na doświetlenie wnętrza oraz uzyskanie pięknego kontrastu ścian pełnych i transparentnych.

W zakresie konstrukcji autorzy opracowali system węzłów stalowych, które połączone z drewnem stworzyły złożoną strukturę kratową. System został tak zaprojektowany, że można zmieniać jego szkielet i pokrycie. Może być dostosowany do podanych parametrów, zdemontowany i umieszczony w nowym projekcie, z nowymi parametrami.

Struktura kratowa bez dodatkowych podpór pozwala na dużą swobodę w projektowaniu wnętrza i elewacji. Okna i otwory mogą być swobodnie umieszczane, a ściany wewnętrzne nie muszą być obciążone. Proces „dekonstrukcji” kopuły geodezyjnej rozpoczęto od podziału na cztery części. W efekcie tego podziału wielkie okręgi stworzyły linie, które były następnie cięte wzdłuż podziału powierzchni. Rozdrobnione powierzchnie sferyczne były skalowane od środka kuli i dlatego pozostają zgodne z oryginalną geometrią kopuły geodezyjnej.

Podsumowanie

Przełom dokonany w latach 50. i 60. poprzedniego stulecia rozpoczął nową erę architektury opartej na geometriach nieeuklidesowych. Osiągnięcia takich pionierów, jak Eero Saarinen i Jørn Utzon oraz aktualnie działających architektów (Kristoffer Tejlgaard and Benny Jepsen) przyczyniły się do wypracowania nowych wzorców dynamicznej ekspresji we współczesnej architekturze. Przeprowadzona analiza i studium przypadków wykazują śmiałość nowoczesnych kompozycji architektonicznych opartych na układach nieliniowych w stosunku do tradycyjnej modernistycznej architektury.

Kształtowanie przestrzenne architektury na bazie geometrii sferycznej i elipsoidalnej doprowadziło do stworzenia nowych wzorców harmonii architektury opartej na geometrii nieeuklidesowej – eliptycznej i sferycznej. Nowe środki wyrazu stosowane w dobie informacyjnej poszerzyły znacznie możliwości kształtowania przestrzennego w organicznym projektowaniu architektonicznym. Wielu twórców zwróciło uwagę na zalety wykorzystania

paraboloidy elipsoidalnej i geometrii sferycznej. Zwłaszcza ta ostatnia umożliwia opracowanie prostych elementów prefabrykowanych, co umożliwiło budowę tak złożonego obiektu, jak Opera w Sydney w czasach, gdy projektanci nie dysponowali technikami komputerowymi. Jednak już w latach 30. i 50. XX wieku mogli planować wykonanie złożonych powierzchni, np. zadaszeń z powłok w systemie prefabrykacji. Dziś możliwe jest również budowanie powierzchni złożonych z krzywoliniowych płatów wydzielanych z projektowanej całości. Projektanci, podpatrując naturę nie tylko w jej wizualnym pięknie, ale w jej działaniu i aktywnym współdziałaniu ze środowiskiem, tworzą wzorce nowej organicznej architektury, czerpiąc z palety środków, jakich dostarczają geometrie nieeuklidesowe.

Bibliografia

- Borsuk K., Szmielw W. (1972), *Podstawy geometrii*, PWN, Warszawa.
- Chencks Ch. (1987), *Ruch nowoczesny w architekturze*, Wydawnictwa Artystyczne i Filmowe, Warszawa.
- Eero Saarinen & Associates, Project Descriptions, Eero Saarinen Collection (MS 593), Series IV, *Project Records, Manuscripts and Archives*, Yale University Library.
- Foxe D.M. (2010), *Saarinen's Shell Game: Tensions, Structures, and Sounds at MIT*, "Nexus Network Journal", DOI:10.1007/s00004-010-0027-3.
- Juszkiewicz A.P. (1977) (red.), *Historia matematyki*, t. 3, PWN, Warszawa.
- Kordos M. (1994), *Wykłady z historii matematyki*. WSiP, Warszawa.
- Mainstone R. (1998), *Developments in Structural Form*, Architectural Press, Oxford, Boston, Melbourne.
- Miller M. (2014), *AD Classics: Kresge Auditorium / Eero Saarinen and Associates*, ArchDaily.
- Saarinen E. (1957), *Function, Structure and Beauty* (speech transcript), "Architectural Association Journal", No. 43.
- Tobolczyk M. (2019), *Wzorce oparte na geometriach nieeuklidesowych w architekturze współczesnej*, cz. I, „Kwartalnik Naukowy Uczelni Vistula”, nr 1(59).
- Whitehead R. (2014), *Saarinen's shells: The evolution of engineering influence*, "Architecture Conference Proceedings and Presentations", No. 84.
- (www1) <http://isap.sejm.gov.pl> [dostęp: 15.03.2019].
- (www2) <https://architectureau.com/articles/utzons-centenary-marked-with-exhibition-of-rare-archival-material/#img-9> [dostęp: 15.03.2019].
- (www3) <https://www.sydneyoperahouse.com/our-story/sydney-opera-house-history/spherical-solution.html> [dostęp: 15.03.2019].
- (www4) <https://www.archdaily.com/276056/peoples-meeting-dome-kristoffer-tejlgaard-benny-jepsen/> [dostęp: 15.03.2019].
- (www5) <https://pdfs.semanticscholar.org/1334/5b49fbbd87c1484e600fa5e91f3570180203.pdf> [dostęp: 15.03.2019].
- (www6) <http://www.matematyka.wroc.pl/book/kopuly-geodezyjne-i-sfery-wenningera> [dostęp: 15.03.2019].
- (www7) <https://structurae.net/de/bauwerke/dywidag-versuchsschale> [dostęp: 15.03.2019].

PATTERNS OF HARMONY BASED ON NON-EUCLIDEAN GEOMETRY IN CONTEMPORARY ARCHITECTURE (PART II)

Summary

The breakthrough that happened in the years fifties and sixties of the previous century, began a new era of architecture based on non-Euclidean geometries. The pioneers such as the Eero Saarinen and, Jørn Utzon and currently active architects Kristoffer Tejlgaard and Benny Jepsen contribute to the development of new patterns of dynamic expression in contemporary architecture. Analysis and Case studies show the bravery of modern architectural compositions based on nonlinear systems in relation to traditional modernist architecture.

Spatial shaping of the architecture on the basis of spherical and ellipsoid geometry led to the creation of new architectural harmony based on non-Euclidean geometry – elliptical and spherical ones. The new means of expression used in the information era have broadly expanded the possibilities of spatial shaping in organic architectural design. Many creators can use the advantages of ellipsoidal paraboloids and spherical geometry. Especially the latter one enables the development of simple prefabricated elements, which made it possible to construct such a complex object as the Sydney Opera at a time when the designers did not have possibility to use computer techniques. However, in the years 30-50 – of the 20th century they could plan the execution of complex surfaces, covered with coatings in the prefabrication elements. Today it is moreover possible to build non-linear surfaces separated of the whole. Nowadays, designers can create patterns of the new organic architecture, by taking inspiration from nature not only by considering its visual beauty, but by observing its active interaction with the environment, and drawing from the palette of measures that provide non-Euclidean geometry.

Key words: organic architecture, geometry-based harmony, spherical geometry in architecture, elliptical geometry in architecture.

Artykuł zaakceptowany do druku w maju 2019 roku

Afiliacja:

dr hab. inż. arch. Marta Tobolczyk

Akademia Finansów i Biznesu Vistula

Europejski Wydział Sztuk

ul. Stokłosa 3

02-787 Warszawa

e-mail: mtobolczyk@yahoo.com