

Dr hab. Edwin Koźniewski
Politechnika Białostocka
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
ul. Wiejska 45E
15-351 Białystok

Recenzja Rozprawy Doktorskiej
mgr inż. Anity Pawlak-Jakubowskiej
Ruchome przekrycia – budowa geometryczna, kinematyka, technologia wykonania

Recenzję przygotowano na prośbę Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej wyrażoną w piśmie, o sygnaturze RB-0/ 4020/15/16, z dnia 29 kwietnia 2016 roku.

1. Struktura formalna pracy

Rozprawa składa się z jedenastostronicowego prologu zawierającego: tytuł, podziękowania, streszczenia w językach polskim i angielskim, spis treści oraz zestawienie symboli i oznaczeń. Zasadnicza część pracy (160 stron) składa się z siedmiu rozdziałów, w tym z wstępu i podsumowania. Ponadto zamieszczono bibliografię (88 artykułów, rozdziałów i pozycji książkowych, pięć patentów, 22 normy, 44 adresy stron internetowych), spis 107. rysunków, spis 34. tablic oraz w formie załącznika (na płycie CD) modele badawcze w ruchu w postaci filmów pokazowych.

2. Cel i tezy pracy

Celem pracy, przedstawionym przez Autorkę, była *realizacja* (wirtualna) *przekrycia dachowego, którego ruch generuje wielokrotną zmianę jego kształtu*, by udowodnić przyjętą w rozprawie tezę, że *możliwe jest wykonanie przekrycia dachowego w postaci mechanizmu płaskiego zapewniającego ruch zadaszania oraz wielokrotną zmianę jego kształtu podczas przemieszczenia. Realizacja celu związana była, zgodnie z przyjętą koncepcją pracy, z opracowaniem komputerowych modeli ruchomych zadasznień, zapewniających możliwość modyfikacji geometrii części lub całego dachu, poprzez przemieszczenie poziome i zmianę wysokości wybranych punktów zamocowania. Zwieńczeniem tych działań miała być budowa geometryczna przekrycia z wyznaczeniem kinematyki i ostatecznym rozwiązaniem zapewniającym ruch.*

3. Treść rozprawy, uwagi i komentarze

Przyjęta przez Autorkę metodologia realizacji postawionego zadania sprowadziła się najpierw do próby „inwentaryzacji” (na podstawie literatury i kwerendy internetowej): geometrii powierzchni ze szczególnym uwzględnieniem tych obiektów, których płaty mogą stanowić przekrycia dachowe; struktury i technologii wykonania przekryć z panelami sztywnymi i zmiennymi wraz z teoretycznym studium kinematyki mechanizmów. Wszystko w celu, by sformułować modele badawcze w oparciu o oprogramowanie umożliwiające parametryczne modelowanie CAD i konstrukcję numerycznych reprezentacji kinematycznych proponowanych rozwiązań. Na każdym etapie realizacji tematu Autorce towarzyszyło przeświadczenie o konieczności dokonywania równoczesnej systematyki czy klasyfikacji pojęć, obiektów i rozwiązań. Trudną do zrealizowania, aczkolwiek możliwą, klasyfikację można przeprowadzić tak: zgromadzić możliwie obszerną dostępną próbę (w rozumieniu statystycznym) realizacji i każdemu elementowi próby przyporządkować determinanty: kształt geometryczny przekrycia (np. powierzchnia siodłowa), system przemieszczania

elementów, struktura i materiał, mechanizm napędowy i konstrukcja wsporcza, konstrukcja podstawy i plac budowy, ...

Autorka dokonała analizy 57 przekryć. Szkoda, że dla większej jasności nie podjęła się dodatkowego niewielkiego trudu poindeksowania poszczególnych realizacji przekryć w celach: umieszczenia odpowiednich indeksów na wszystkich zamieszczonych fotografiach, zwiększających jasność wyводу; większej dyscypliny w opisanu wszystkich istotnych cech (determinant); stworzenia pełnej tabelarycznej klasyfikacji. Recenzujący pracę tak uczynił numerując analizowane przez Autorkę przekrycia od R01 do R57, czego efektem było m.in. policzenie wszystkich, ale przede wszystkim dookreślenie badanej próby na użytek opracowania recenzji.

Z punktu widzenia geometrii typu (kształtu) powierzchni przekryć Autorka przestudiowała tylko niektóre: powierzchnię stożkową (rys. 2.2a), paraboloidę hiperboliczną (rys. 2.3a), powierzchnię walcową (rys. 2.2e, f), konoidę paraboliczną (rys. 2.3b), których parametry są łatwe do zauważenia. Ale już o dokładniejszych kształtach powierzchni kopulastych, cebulastych, baniastych nie dowiadujemy się z przeprowadzonej analizy. Ładnie wykonane przez Autorkę (choć niezbyt efektownie przedstawione w tabeli 2.1) formy geometryczne powierzchni konstrukcji membranowych z użyciem programu Formfinder Professional 4.5 nie zawierają żadnego opisu parametrycznego, ani tym bardziej odniesienia do realizacji analizowanych 57. przekryć. W szczególności, interesujące byłoby na przykład, dla poszukiwania własnych propozycji zadaszeń, znać kształt krzywej tworzącej leja stożkowego powierzchni przekrycia Amfiteatru w Ustroniu i wiedzieć w jakim stosunku do zaprojektowanego pozostaje kształt rzeczywisty. Jaką krzywą stanowi linia przenikania tych dwu powierzchni stożkowych-lejowych, która w przypadku dwu zwykłych powierzchni stożkowych jest hiperbolą. Informacja ta jest o tyle interesująca, że w takich przypadkach kształt krzywej jest kształtem elementu (dźwigara) konstrukcji wsporczej. Także, efektownie opracowane kształty dachów membranowych (tabela 2.2) nie mają swojego konkretnego odniesienia praktycznego. Dalej Autorka stwierdza, że powierzchnie minimalne takie, jak katenoida czy helikoida bardzo rzadko występują w realizacjach zadaszeń (s. 24), ale nie wskazuje, gdzie można spotkać takie rozwiązania. Warto byłoby wspomnieć o krzywych i powierzchniach offsetowych, których spektakularne zastosowania mamy w przypadku paneli nasuwanych. Zwłaszcza dotyczy to powierzchni obrotowych, które nie mają kształtu sfery.

Odnosnie wykorzystania powierzchni B-sklejanych (nie wiem czy muszą to być zawsze powierzchnie NURBS) Autorka słusznie stwierdza, że powierzchnie te efektownie wykreowane wymagają jednak zastosowania cięgien zmieniających swą długość i materiałów o dużej elastyczności. Równocześnie proponuje formy walcowe (podział na prostokąty) oraz stożkowe i siodłowe (zbudowane z trójkątów) jako powierzchnie technologicznie możliwe do wykonania (rys. 1.5). Możliwość „obudowania” trójkątami powierzchni siodłowej wymaga wyjaśnienia z co najmniej dwóch powodów. Po pierwsze, nie wszystkie dłuższe boki trójkąta są tworzącymi powierzchni siodłowej i po drugie, długości (dłuższych) boków trójkątów są różne, niezależnie od tego czy są czy nie tworzącymi (rys. 1.5c – pomyłka w opisie rysunku). Możliwość wykorzystania powierzchni siodłowej w dachach ruchomych wydaje się więc problematyczna. Zupełnie odwrotną sytuację mamy w odniesieniu do dachów stałych; wykorzystanie w konstrukcji dachów stałych znalazło się w wielu realizacjach, co najmniej dwie są znane w Polsce.

W kontekście analizy przykładów przekryć, Autorka nie wspomniała o ważnych powierzchniach wielościennych jakimi są kopuły geodezyjne. Można było natknąć się na te przekrycia choćby z racji studiowania monografii „Architectural Geometry”.

Oddzielny problem stanowi geometryczna klasyfikacja ruchów sztywnych. Z własności izometrii wiadomo, że na płaszczyźnie mamy dwa ruchy sztywne: obrót i przesunięcie, w przestrzeni trójwymiarowej – trzy, dodatkowo ruch śrubowy. Powstaje

zatem pytanie, czy klasyfikowane w tabeli 2.7 ruchy po liniach zakrzywionych nie będących okręgami (a więc o zmiennych środkach krzywizny) są obrotami czy ruchami przesuwными (np. pierwszy wiersz w tabeli)? Zamieszczona fotografia zrealizowanego przekrycia sugeruje, że są tam zastosowane wózki jezdne, co wskazywałoby na to, że rozkładanie i składanie przekrycia odbywa się poprzez ruch przesuwny. To samo dotyczy wiersza czwartego i piątego tabeli 2.7. Jeśli jest wózek jezdny, to nie jest to ruch obrotowy, a przesuwny a więc emanacja (złożenie) przesunięcia i obrotu, co w efekcie na ogół geometrycznie da obrót, zaś realizacja fizyczna wskazuje na ruch przesuwny. A może należało nazywać to ruchem przesuwno-obrotowym albo mieszanym?

Specjalnego wyjaśnienia wymaga treść rysunku 2.9 (fotografia i rysunek), podpis rysunku i tekst pod rysunkiem. Nie ma tam wspólnej osi obrotu (jak pisze Autorka i oznacza tę oś w tekście (str. 34) przez l a na rysunku 2.9 przez l) w przypadku otwierania przekrycia w formie parasola. Jest natomiast wspólna prowadnica pionowa i w każdej z n płaszczyzn (n trójek osi obrotu (n_i^1, n_i^2, n_i^3)) – a geometrycznie trójek punktów (N_i^1, N_i^2, N_i^3) obrotu) mamy mechanizm powodujący ruch przesuwno-obrotowy. W płaszczyźnie (x, t) każdej tworzącej t , złożonej z trzech ramion (członów) prostoliniowych (t_1, t_2 i t_3) oraz ramienia (członu) r rozpierającego i prowadnicy (pionowej) x mamy płaski mechanizm przesuwno-obrotowy o napędzającej części przesuwnej (oznaczenia: $n, (n_i^1, n_i^2, n_i^3) r, (N_i^1, N_i^2, N_i^3), x, (x, t)$) zostały wprowadzone przez recenzenta. Rysunki 2.9 (lewa strona rysunku) i 2.10 nie opisują ani kinematyki przekrycia, ani form pośrednich konstrukcji wsporczej w postaci parasola przedstawionego na fotografii (rys. 2.9), a jedynie bardzo uproszczoną wersję powierzchni membrany.

Analizując i klasyfikując powierzchnie warto było skorzystać z najlepszej (na pewno w języku polskim) klasycznej klasyfikacji powierzchni potencjalnie wykorzystywanych jako powłoki budowlane autorstwa Profesora Stanisława Polańskiego (Polański i in., 1986). Tym bardziej, że jeden z uczniów Stanisława Polańskiego jest twórcą przekryć z blach fałdowych i jednocześnie współautorem artykułu „Przekrycie i obudowa piłkarskiego Stadionu Narodowego w Warszawie” opublikowanego w czasopiśmie „Inżynieria i Budownictwo”. Współautorami tego artykułu są Knut Göppert, Lorenz Haspel i Andrzej Winkler – wszyscy z firmy projektowej Schlaich Bergermann und Partner (sbp) cytowanej przez Autorkę. Za skorzystaniem przemawiałby m.in. fakt, że klasyfikacja Polańskiego jest zrecznie i zwięźle zilustrowana za pomocą kilku czytelnych schematów i diagramów.

Odnosnie budowy i technologii wykonania przekryć dachowych, analiza została dokonana z podziałem na dwie klasy: z panelami sztywnymi i z panelami zmiennymi, w obu przypadkach w układzie: system przemieszczania segmentów, normy i współczynniki bezpieczeństwa, budowa i technologia wykonania obejmująca opis panelu, mechanizmu napędowego i konstrukcji wsporczej. Przedstawienie kolejnych rozwiązań polegało na szczegółowym podaniu istotnych informacji, a autorskie uzupełnienia rysunkowe i tabelaryczne Doktorantki, zostały na ogół starannie i efektywnie wykonane (rysunki: 3.1 – 3.8, 3.10, 3.12, 3.14, 3.16, 3.20, 3.22 – 3.25, 4.2 – 4.4, 4.12 – 4.13, 4.15 – 4.19, 4.21, 4.22, 4.24, 4.25; tabele: 3.1, 3.2, 4.1) bądź adaptowane z literatury (tabele: 3.3, 4.1, 4.2, 4.6 – 4.9).

Wykonując tak obszerną kwerendę można było, na przyjętym poziomie szczegółowości, dokonać dokładniejszego opisu i tabelaryzacji determinant (parametrów) przekryć ruchomych. Temu też mogłoby służyć poindeksowanie elementów. Pełne zestawienie przekryć ruchomych byłoby ważkim etapem syntezy analizowanego zagadnienia obejmującym np. opis typów wszystkich powierzchni, opis zastosowanych rozwiązań technicznych i technologicznych, częstość występowania tych rozwiązań.

Niezależnie od powyższych uwag, przedstawiony opis jest znaczącym wynikiem profesjonalnej analizy przekryć ruchomych i stanowi dobry punkt wyjścia do badań nad nowymi rozwiązaniami przekryć ruchomych.

Następnie Doktorantka dokonała analizy rozwiązań kinematycznych, z punktu widzenia teorii mechanizmów. W tym celu przedstawiła mechanizmy klasy II wraz z teorią niezbędną do realizacji dalszej, głównej, części rozprawy. Tu zrezygnowała, i powodzeniem, zastosowała metodę projektowania parametrycznego, dostępną w wykorzystywanej wersji programu AutoCAD. Zresztą, możliwość modelowania parametrycznego została zapewniona przez twórców oprogramowania CAD jako spełnienie oczekiwań właśnie głównie projektantów mechanizmów, maszyn, robotów,...

Do badań Doktorantka przyjęła mechanizmy płaskie klasy II, których poszczególne człony wykonują ruchy przesuwne i obrotowe. Pozostała w tym sensie w obszarze badań nie wykraczającym poza rozwiązania przyjęte w dotychczasowych realizacjach przekryć. Preferencją w wyborze rozwiązań było występowanie wielokrotnej zmiany kształtu przekrycia dachowego. Przeprowadzone analizy przemieszczeń członów mechanizmów zamieściła w tabeli 5.2, zaś realizacje uzyskane poprzez połączenie dwóch mechanizmów klasy II w tabeli 5.3. Ważnym ograniczeniem w poszukiwaniu rozwiązania okazało się zapewnienie odpływu wody. Autorka wykluczyła sytuację, w której konieczna byłaby rynna kołowa lub ogólniej nieprostoliniowa. Poszukiwaną wielokrotną zmianę kształtu przekryć ruchomych Doktorantka uzyskała w wyniku połączenia dwóch mechanizmów klasy II, w dwóch układach: symetrycznym i niesymetrycznym. W przypadku układu symetrycznego człony napędzające umieszczono na dwa sposoby.

Ostatecznie Doktorantka wybrała zadaszienia symetryczne i sformułowała cztery modele badawcze: (1) mechanizm w trzema parami obrotowymi i jedną przesuwną o obrotowej napędzającej; (2) podobny mechanizm, ale z parą przesuwną jako napędzającą; (3) połączenie dwóch mechanizmów z członem przesuwnym przemieszczającym się pionowo; (4) model będący modyfikacją przekrycia Wimbledon Center Court (UK) polegającą na zwiększeniu o jeden liczby paneli dachowych w przęśle, co przełożyło się na zwiększenie o jeden liczby członów w mechanizmie. Badania parametrów poszczególnych mechanizmów prowadziła bez nadawania konkretnych wymiarów, jedynie przy określonych proporcjach długości członów mechanizmów, wielkości kąta kształtu, zakresu ruchu członu napędzającego i miały na celu sprawdzenie wielkości (odpowiednio zinterpretowanej) geometrycznej przestrzeni otwartej wyrażonej w punktach procentowych oraz geometryczne możliwości odprowadzenia wody. W modelu (3) badała jedynie przemieszczenia dachu (obszar roboczy mechanizmów). Model (4) ma sens wyjątkowy, ma bowiem swój pierwowzór w postaci zrealizowanego przekrycia Wimbledon Center Court. Autorka dokonała zmiany uzyskując: redukcję liczby dźwigarów, zwiększenie rozpiętości przekrywanej przestrzeni poprzez zmniejszenie powierzchni garażu. W bilansowaniu zalet rozwiązania Autorki pojawiają się nowe problemy, których nie wyartykułowała: (a) trzeba rozwiązać system blokujący ruch panelu i sterowanie nim; (b) w związku ze zwiększeniem liczby paneli należy sprawdzić nośność dźwigarów; (c) przeanalizować podatność na uszkodzenia i awarie bardziej złożonego przekrycia przęsła. (d) Obciążenie wiatrem i śniegiem, to oddzielne problemy do rozwiązania tak zmodyfikowanego przekrycia.

Dla sformułowanych i badanych modeli Doktorantka wykonała modele numeryczne zrealizowane w programie Inventor Professional 2016 i przeprowadziła geometryczną symulację kinematyczną modeli przekryć oraz opracowała prezentacje kinematyczne i filmy.

4. Bibliografia

Spośród 88 pozycji literatury 73 ukazały się po 2000 roku. Można przypuszczać, że są to ważniejsze dostępne klasyczne i nowe, polskie i obce pozycje dotyczące omawianej tematyki.

5. Język, struktura edytorska

Autorka napisała rozprawę poprawnym językiem, w logicznym i starannym układzie edytorskim, zauważono nieliczne literówki wymienione w kolejnym rozdziale recenzji.

6. Dostrzeżone drobne uchybienia (literówki)

- 4.1: Na str. 16, w podpisie rysunku 1.5 przestawiono tekst a) z c).
- 4.2: Na str. 28₈ w tabeli 2.3 zamiast „część” powinno być „częścią”.
- 4.3: Na str. 58₄ zamiast „zderzak” powinno być „zderzaka”.
- 4.4: Na str. 90⁵ zamiast „Narodowy” powinno być „Narodowym”.
- 4.5: Na str. 93² zamiast „ruchomym” powinno być „ruchomych”.
- 4.6: Na str. 104₈ zamiast „podstwę” powinno być „podstawę”.
- 4.7: Na str. 104₈ zamiast „wiązę” powinno być „wiąże”.
- 4.8: Na str. 142⁹ niepotrzebna jest kropka po tytule podrozdziału 6.5.
- 4.9: Na str. 163₁₂ po „Młynarski T.” zamiast „i” powinien być przecinek, a dalej odwrotnie.
- 4.10: Na str. 164₁₁ brak konsekwencji w zapisie; przed nazwiskiem ostatniego autora powinno być „i”.
- 4.11: Na str. 164₉ zamiast „Pouangare C” powinno być „Pouangare C.”.
- 4.12: Na str. 165¹⁰ brak konsekwencji w zapisie; przed nazwiskiem ostatniego autora powinno być „i”.

W pracy przyjęto mało spotykany zwyczaj stawiania kropki po podpisie rysunków i tabel.

7. Ocena pracy i wniosek końcowy

Podjęta przez Doktorantkę tematyka stanowi aktualny problem badawczy, obszerny, interdyscyplinarny teoretycznie i technologicznie. Stąd realizacja wybranej ścieżki ograniczającej badania do płaskich paneli i mechanizmów klasy II stanowiła dalej duże wyzwanie dla Autorki. Wymagała zapoznania się z obszerną materią zagadnienia, zawartą w literaturze drukowanej i wirtualnej, wykonania pokażnej liczby rysunków i fotografii. Przyjęta koncepcja prowadzenia badań, obok rozpoznania tematycznego przekryć ruchomych, zakładała potrzebę bardzo dobrej znajomości najnowszych wersji wybranego oprogramowania CAD (AutoCAD – programowanie parametryczne, Inventor Professional, Formfinder Professional). Przypuszczalny, niejako z natury rzeczy, brak dostępu do szczegółowej dokumentacji technicznej rozwiązań funkcjonujących przekryć stanowił dodatkową barierę w poznawaniu szczegółów, niezbędnych do badań prowadzonych w obszarze najszerzej rozumianej geometrii analizowanych obiektów. Przeprowadzenie więc owocnej i twórczej analizy przekryć na podstawie dostępnych materiałów należy uznać za znaczący sukces Doktorantki. Do najważniejszych osiągnięć należy więc zaliczyć sformułowanie metodologicznej ścieżki postępowania, odpowiedniej do przeprowadzenia badań nad przekryciami ruchomymi, drogą symulacji geometrycznej z użyciem najnowszego oprogramowania i (czy raczej poprzez) praktyczne jej „przetarcie”. Rozwiązanie zagadnienia naukowego wykonania przekrycia dachowego w postaci mechanizmu płaskiego, gdzie realizowany jest ruch zadaszania z wielokrotną zmianą jego kształtu jest rezultatem poszukiwań badawczych zamieszczonych w pracy. Doktorantka pokazała, że potrafi twórczo pracować naukowo, a wybrany obszar badań gwarantuje wystarczające zaplecze badawcze na przyszłość.

W moim przekonaniu przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw – Dz. U. 2011 nr 84 poz. 455, nr 112, poz. 654, z 2012 r. poz. 1544. **Stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Białystok, dnia 8 czerwca 2016 roku.



Edwin Kwimiel