

**Politechnika Śląska**  
**Wydział Mechaniczny Technologiczny**  
**Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn**

**Grzegorz ŚWIACZNY**

**METODYKA OPTYMALIZACJI  
STRUKTURY ASOCJATYWNYCH  
MODELI CAD**

**Rozprawa doktorska**

**Promotor: Dr hab. inż. Prof. PŚ Marek Wyleźoł**

**GLIWICE 2023**



## Spis treści

<b>Spis treści</b> .....	3
<b>1 Wprowadzenie</b> .....	5
1.1 Wstęp .....	5
1.2 Problem badawczy .....	9
1.3 Cel rozprawy .....	10
1.4 Tezy rozprawy .....	10
1.5 Zakres rozprawy .....	11
<b>2 Historia Systemów CAD</b> .....	13
2.1 Geneza komputerowego wspomaganie projektowania CAD .....	13
2.2 Pionierzy komputerowego wspomaganie projektowania CAD.....	18
2.3 Od CAD/CAM do CAx .....	22
2.4 Podsumowanie .....	25
<b>3 Techniki tworzenia modeli CAD w Modelowaniu Jednoznacznym</b> .....	27
3.1 Od Modelowania Geometrycznego do Modelowania Jednoznacznego .....	27
3.2 Geneza Modeli CAD .....	29
3.2.1 Komputerowe Wspomaganie Rysowania (ang. <i>Computer Aided Drafting</i> ).....	29
3.2.2 Modelowanie Krawędziowe (ang. <i>Wire Frame Modeling</i> ) .....	31
3.2.3 Modelowanie Powierzchniowe (ang. <i>Surface Modeling</i> ).....	31
3.2.4 Modelowanie Bryłowe (ang. <i>Solid Modeling</i> ).....	36
3.2.5 Modelowanie Hybrydowe (ang. <i>Hybrid Modeling</i> ).....	40
3.2.6 Podsumowanie .....	41
3.3 Techniki Modelowania Jednoznacznego .....	42
3.3.1 Modelowanie w oparciu o Cechy Geometryczne (ang. <i>Feature-Based Modeling</i> )....	43
3.3.2 Modelowanie Poziome (ang. <i>Horizontal Modeling</i> ).....	47
3.3.3 Modelowanie Wieloobiektowe (ang. <i>Multi-Body Modeling</i> ) .....	54
<b>4 Technika Modelowania Jednoznacznego (ang. <i>Unambiguous Modeling</i>)</b> .....	59
4.1 Konsekwencje zastosowania geometrii zorientowanej w systemach CAD.....	60
4.2 Wytyczne Modelowania Jednoznacznego – Procedura Jednoznaczności .....	64
4.3 Wytyczne Modelowania Jednoznacznego – Procedura Neutralności .....	84
4.4 Implementacja Modelowania Jednoznacznego do topologii modelu CAD.....	97
4.5 Implementacja Modelowania Jednoznacznego do badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD .....	122
<b>5 Wyniki badań</b> .....	139
5.1 Implementacja Modelowania Jednoznacznego do topologii modelu CAD.....	139
5.2 Implementacja Modelowania Jednoznacznego do badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD .....	143

<b>6 Podsumowanie i wnioski</b> .....	147
<b>Załącznik</b> .....	151
1. Elementy składowe topologii powierzchniowej modelu 3D utworzonego przy użyciu techniki Modelowania Poziomego.....	151
2. Tworzenie topologii powierzchniowej modelu 3D przy użyciu techniki Modelowania Poziomego.....	160
3. Tworzenie topologii bryłowej modelu 3D przy użyciu techniki Modelowania Wieloobiektowego .....	177
4. Integracja powierzchniowej i bryłowej topologii modelu 3D .....	191
<b>Literatura</b> .....	201
<b>Streszczenie</b> .....	205
<b>Summary</b> .....	206

# 1 Wprowadzenie

W niniejszej rozprawie doktorskiej autor przedstawia metodykę optymalizacji struktury asocjatywnych modeli 3D w środowisku komputerowego wspomaganie projektowania CAD (z ang. *Computer Aided Design*). Wybrany środowiskiem jest system klasy CAx – CATIA V5, jednak metodyka ta może być zaimplementowana również w innych współczesnych systemach CAD umożliwiających tzw. projektowanie parametryczne przy użyciu określonych narzędzi programowych. Autor zaproponowaną metodyką zachęca czytelnika do spojrzenia od nowa na istniejące już procedury i narzędzia programowe realizujące te procedury wykorzystywane w procesie tworzenia modeli 3D oraz skupia jego uwagę na najważniejszych jej aspektach. Wynika to z tego, że owe najważniejsze aspekty są powszechnie znane każdemu użytkownikowi systemów wspomagających projektowanie, jednak podstawą jest zrozumienie w jaki sposób efektywniej się nimi posługiwać. Fundamentem proponowanej metodyki jest dążenie do wykorzystania nieskomplikowanych środków do tworzenia skomplikowanych i asocjatywnych topologii wirtualnych geometrii. Upraszczając można stwierdzić, że złożoność geometryczna konstruowanego elementu jest odwrotnie proporcjonalna do złożoności narzędzi programowych, za pomocą których konstruktor tworzy ten element.

Tematyka niniejszej pracy wynika z wieloletniej praktyki zawodowej autora na stanowiskach konstruktora, starszego konstruktora oraz głównego inżyniera, uzyskanej w gronie wielokulturowych zespołów, która pozwoliła mu zdobyć wiedzę i doświadczenie konstruktorskie przy realizacji międzynarodowych projektów. Tematyka ta wynika też z jego pasji do systemów komputerowego wspomaganie prac inżynierskich, która narodziła się jeszcze podczas studiów. Wtedy to zrealizował on swoje pierwsze projekty, podczas których koncentrował się na tworzeniu struktur modeli 3D – najpierw na zakończenie studiów inżynierskich, a następnie na zakończenie studiów magisterskich.

## 1.1 Wstęp

Rozpoczynając tę rozprawę doktorską autor pragnie nadmienić, że jego celem nie jest ukazanie ponad 70-ciu lat badań, rozwoju i praktyki zawodowej poruszanego obszaru tematycznego w jakimkolwiek negatywnym świetle. Ów obszar tematyczny, a więc metodyka optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD mógłby sugerować, że autor przedstawił tu treścią będzie faworyzował pewne zachowania i nawyki konstruktorskie stawiając je ponad inne – obecnie powszechnie znane i stosowane w sferze gospodarczej i naukowej. Z definicji „metodyka” oznacza przecież zbiór zasad dotyczących sposobów wykonywania jakiejś pracy lub trybu postępowania prowadzącego do określonego celu [11]. W istocie poruszane tu kwestie, zwłaszcza odnoszące się do wykorzystania konkretnych narzędzi programowych CAD podczas tworzenia modeli 3D, nie pokrywają się w pełni z ogólnie przyjętymi standardami zawartymi w dostępnej literaturze jak i standardami biur konstrukcyjnych oraz firm wykorzystujących oprogramowanie CAD. Jednak celem autora, poprzez tę rozprawę, nie jest na nowo odkrywanie i definiowanie istniejących już reguł i zasad, którymi rządzą się sposoby tworzenia modeli CAD. Natomiast powodem tego jest choćby fakt, że nie ma jednego uniwersalnego sposobu ich sporządzania, który jest optymalny zawsze i w każdej sytuacji.

Jak wiadomo, optymalizacja jako racjonalny zabieg jest możliwa wówczas, gdy istnieją różne możliwości i przyjęte kryteria wyboru [10]. Definicja ta bardzo dobrze wpisuje się

w poruszaną tu tematykę. Istnieje bowiem wiele możliwości w procesie tworzenia modeli 3D, jednak tylko część z nich w konsekwencji umożliwia konstruktorowi wypełnienie jednej z relacji do postawionego kryterium optymalizacyjnego: minimalizację nakładów lub maksymalizację efektów. Na dziś nie należy jednak oczekiwać od osoby tworzącej jakąkolwiek metodykę sporządzania modeli CAD uzyskania optimum bezwzględne. W praktycznym działaniu osiągamy optimum względne, co jest konsekwencją tego, że dobór kryteriów nigdy nie jest idealny, a pole możliwości ograniczone [10]. Autor w zaproponowanej metodyce optymalizacji struktury wirtualnych modeli wykorzystuje istniejące już narzędzia programowe i techniki, jednak robi to koncentrując uwagę czytelnika na detalicznym realizowaniu ich topologii, biorąc pod uwagę stosowanie konkretnych środków w określonym miejscu i czasie powstawania danego drzewa struktury. Fundamentem metodyki jest świadome wykonywanie topologii modeli 3D i pełna nad nią kontrola – w znaczeniu kontroli geometrycznej, a nie matematycznej. Kontrolę nad matematycznym opisem tworzonych modeli „sprawuje” bowiem system CAD, a ściślej system klasy CAx o czym szerzej w Rozdziale 2 – w rozprawie wszystkie poruszane kwestie są prezentowane w oprogramowaniu CATIA V5, niemniej jednak ich uniwersalność sprawia, że mogą one być zastosowane w innych systemach oferujących wspomaganie projektowania parametrycznego przy użyciu określonych narzędzi programowych.

Czy są jednak jakieś przesłanki, by systemy CAD i sposoby tworzenia w nich dokumentacji projektowo-konstrukcyjnej stały się na tyle znaczącym tematem, by pisać o nich pracę doktorską? W pierwszej kolejności należy mieć na uwadze, że zapis konstrukcji, jakim w dzisiejszych czasach są modele 3D, od początku swojego istnienia pełni główną rolę w procesie wytwarzania wytworu, który to następnie staje się środkiem technicznym. Dzięki zapisowi konstrukcji stało się możliwe wytwarzanie:

- w różnych wytwórniach i w różnym czasie tego samego środka technicznego lub jego elementów składowych, czy też potrzebnych materiałów pod postacią takich samych wytworów;
- w różnych wytwórniach dowolnie dużej liczby wytworów, przy czym te same wymagania były stawiane takim samym wytworom [10].

Dążenie człowieka do usprawnienia procesu powielania wytworów oraz rozwój technologii komputerowej pozwoliły na radykalną zmianę podejścia do tworzenia ogólnie pojętej dokumentacji technicznej. Początkowo ciężko to było nawet nazwać dokumentacją techniczną. Już w starożytności do budowy okrętów korzystano z szablonów, które zastosowane do nakreślenia profili wręg pozwalały na nieomal seryjną produkcję kadłubów. Technikę przygotowania szablonów kadłuba, których kształt można byłoby opisać za pomocą zestawu stycznych do siebie łuków okręgów, rozwinęli w okresie średniowiecza Wenecjanie. Drewniane szablony były tak popularne, że aż do końca XVI wieku do budowy okrętów nie stosowano rysunków [62]. Niemniej jednak postęp związany z upowszechnieniem przemysłowej metody druku w latach 40-tych i 50-tych XV wieku przez niemieckiego rzemieślnika, złotnika i drukarza Johanna Gutenberga [35], rozwój koncepcji rysunku perspektywicznego, którą pod koniec XV wieku zapoczątkował „człowiek renesansu” – Leonardo da Vinci [6], czy jeszcze wcześniejsze dokonania w dziedzinie geometrii greckiego matematyka Euklidesa [12] i dokonania wielu innych uczonych sprawiły, że zapis konstrukcji stopniowo ewoluował. Konwencjonalne konstruowanie zapoczątkowane wraz z rewolucją przemysłową w XVIII wieku w Anglii i Szkocji [1] sprowadzało się do wykorzystywania takich przyrządów jak: deski kreślarskie, pantografy, liniały, przykładnice, zestawy krzywików. Nieocenionym wkładem do tej metody wykazał się w tamtym czasie jeszcze jeden ówczesny „człowiek renesansu” – Gaspard Monge, uznawany za twórcę

geometrii wykreślnej [17]. Rysunki wykonywane metodą konwencjonalną wymagały od inżyniera umiejętności precyzyjnego (doprowadzonego niemalże do perfekcji) prowadzenia ołówka, pióra i innych przyrządów kreślarskich, a także benedyktyńskiej cierpliwości przy nanoszeniu jakichkolwiek zmian i poprawek. Przez długie lata metalowe ostrze nożyka, stalówki, czy też żyłki towarzyszyło na równi z „gumką myszką” projektantom i konstruktorom podczas żmudnego przenoszenia ich wizji z umysłu na papier, który nie zawsze okazywał się wystarczająco cierpliwy [47]. Wynalezienie pod koniec lat 50-tych XX wieku przez amerykańskiego inżyniera Jacka Kilby’ego układu scalonego [40] otworzyło sferze inżynierskiej nowe perspektywy na wykorzystanie nowatorskiej technologii, a co za tym idzie pozwoliło znacząco odciążać inżynierów zwłaszcza w kwestii manualnego tworzenia i modyfikowania dokumentacji projektowo-konstrukcyjnej. Szybko też okazało się, że dzięki komputerowemu wsparciu zauważalnie przyspieszony stał się proces nanoszenia wszelkich zmian i modyfikacji w dokumentacji, w dodatku bez konieczności posiadania manualnych umiejętności osób ją tworzących. Niestety, jak to zwykle bywa z nowatorskimi technologiami, potrzeba było czasu na opracowanie i zbudowanie odpowiedniej infrastruktury – w tym przypadku informatycznej, w skład której wchodził sprzęt komputerowy, jak i oprogramowanie oraz na zmniejszenie jej kosztów wytwarzania. Wreszcie postęp w procesie tworzenia dokumentacji projektowo-konstrukcyjnej z udziałem systemów CAD stał się na tyle znaczący i na tyle powszechny, że w drugiej połowie XX wieku zaobserwowano trend wśród przedsiębiorstw produkcyjnych odchodzenia od konwencjonalnych technik kreślarskich i coraz częstszego zwracania się w kierunku wykorzystania komputerowego wspomaganie prac inżynierskich.

Należy również pamiętać, że wspomniane komputerowe wspomaganie prac inżynierskich dotyczy się nie tylko samych systemów CAD, bowiem w dzisiejszych czasach jest to dziedzina rozległa na niemal każdy aspekt związany z projektowaniem i wytwarzaniem wytworów. Dlatego, zdaniem autora, warto jest wiedzieć, gdzie było umiejscowione komputerowe wspomaganie projektowania najpierw w zintegrowanych systemach CAx [43], później w zintegrowanych systemach wytwarzania CIM (ang. *Computer Integrated Manufacturing*) [15] i gdzie jest umiejscowione w chwili obecnej – w dobie systemów zarządzania cyklem życia produktu PLM (ang. *Product Lifecycle Management*) [22]. Temat ten szerzej został poruszony w Rozdziale 2 niniejszej pracy.

Systemy CAD jako samodzielne jednostki, lub też jako część zintegrowanych systemów komputerowego wspomaganie, niosą za sobą wiele korzyści. Jednak zdaniem autora nawet dzisiaj świadomość na temat tych korzyści w sferze inżynierskiej nie jest wystarczająca. Jednocześnie poznanie zasad funkcjonowania systemów CAD, a także poznanie podstaw związanych z ich środowiskiem ogólnie pojętego komputerowego wspomaganie prac inżynierskich, są według autora zagadnieniami, bez których nikt nie może od nikogo oczekiwać zrozumienia i docenienia technik CAD nawet w sytuacjach, w których mogą one być efektywnie wykorzystane. Oczywiście w dostępnej literaturze można uzyskać odpowiedź na potencjalne pytania dotyczące zasadności wprowadzania tego typu systemów do przedsiębiorstw, czy też do programów szkolnictwa wyższego. Przykładowo, głównych korzyści z wprowadzenia technik CAx należy upatrywać m.in. w:

- skróceniu czasu konstruowania wyrobów i czasu opracowania ich procesów technologicznych,
- zmniejszeniu nakładów na modernizację konstrukcji,
- zmniejszeniu wydatków na dostarczanie, kontrolę i zarządzanie danymi,
- wariantowaniu rozwiązań konstrukcyjnych i opracowań technologicznych,
- szybkiej aktualizacji danych,

- obniżeniu kosztów opracowania dokumentacji,
- możliwości stosowania technik symulacji, głównie procesów obróbki, umożliwiających weryfikację i modyfikację programów NC,
- integracji danych geometrycznych w zadaniach obliczeniowych, symulacyjnych czy technologicznych [7].

W praktyce jednak nie należy oczekiwać, że samo wprowadzenie technik CAx do procesu projektowo-konstrukcyjnego wytworu spowoduje nagłe urzeczywistnienie się powyższych profitów. Logicznym wydaje się potrzeba edukacji w poruszonym temacie kadry inżynierskiej, ale również kadry managerskiej. Z perspektywy autora, którego wieloletnia kariera zawodowa związana jest z branżą przemysłową, istnieje zauważalny dysonans między wspomnianymi grupami zawodowymi, w kwestii znaczenia technik CAD dla sfery gospodarczej, przez co w ogólnym rozrachunku techniki te w dalszym ciągu nie są w pełni wykorzystywane. W nowoczesnej inżynierii produkcji szczególnie ważna jest faza projektowania i technicznego przygotowania produkcji. Z badań wynika bowiem, że fazie rozwoju produktu przypisuje się aż 70% wpływu na koszty ponoszone na wszystkich etapach realizacji produkcji. Ponadto, jak pokazuje doświadczenie, około 40-60% danych, potrzebnych w procesie wytwarzania, może być odtwarzana z innych, wcześniej opracowanych zbiorów i dokumentów [7]. Rola konstruktora w procesie projektowo-konstrukcyjnym jest najważniejsza, bo to głównie dzięki jego wiedzy i doświadczeniu wyprodukowany wytwór spełnia postawione w początkowej fazie rozwoju projektu wymagania i normy. Mimo, że użytkownicy systemów CAD mają ograniczone możliwości wpływania na rodzaj funkcji oferowanych przez te systemy, to poprzez właściwą organizację procesu projektowego, organizację struktury modelu oraz poprawny wybór narzędzi programowych i ich danych wejściowych, mogą oni w sposób znaczący poprawić efektywność zastosowania takiego systemu [62]. Dlatego też swego rodzaju integracja wspomnianych grup zawodowych pozwoliłaby na wzajemne zrozumienie, a co za tym idzie lepsze wykorzystanie systemów CAD. Autor tematyką tej rozprawy doktorskiej dotyka najważniejszej kwestii – z punktu widzenia lepszego ich wykorzystania – modeli 3D, których to sposób tworzenia, a co za tym idzie optymalizacja ich struktury, znacząco może przyczynić się do realizacji wymienionych w tym akapicie profitów. W kwestii efektywności samej produkcji, warto nadmienić, że w 92 numerze niemieckiego miesięcznika ZWF został opublikowany artykuł zawierający ankietę, która została przeprowadzona w przemyśle niemieckim i w której odniesiono się do najważniejszych czynników wpływających na tę efektywność. Spośród kilkunastu dostępnych do najwyżej ocenianych zaliczono takie czynniki jak: czas realizacji zleceń, terminowość, krótki czas reagowania na zmiany czy jakość wytworu [66].

Zatem jeśli sposób tworzenia modeli 3D wpływa na czas, koszt i jakość finalnego wytworu, to można stwierdzić, że potrzeba wprowadzania modyfikacji i zmian konstrukcyjnych w strukturze modelu 3D uzasadnia dążenie do jego optymalizacji już na etapie jej tworzenia. Łącząc wszystkie powyższe spostrzeżenia można dojść do wniosku, że systemy CAD w istotnej mierze przyczyniają się do zwiększenia efektywności produkcyjnej przedsiębiorstwa. W związku z powyższym wydaje się, że przesłanki do poruszania tematyki związanej z optymalizacją struktury asocjatywnych modeli CAD istnieją, a celowość niniejszej pracy jest zasadna. Zdaniem autora wskazane jest też, by była ona poruszana jak najczęściej, tak aby wspomniane na początku tego wstępu 70 lat badań, rozwoju i praktyki zawodowej zaowocowało większą jej świadomością środowiska inżynierskiego, jak i managerskiego, a w konsekwencji w większy sposób przyczyniła się do rozwoju technologii wytwarzania wytworów i środków technicznych.



## 1.2 Problem badawczy

Problem badawczy, jakim zajął się autor, jest związany z opracowaniem metodyki optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD z zastosowaniem nowego, nie stosowanego wcześniej podejścia. W proponowanym podejściu optymalizacja ta realizowana jest przy użyciu podstawowych środków w postaci narzędzi programowych charakterystycznych dla współczesnych systemów CAD. W związku z postępującym procesem integracji systemów komputerowego wspomaganie CAx często do tego typu zadań „angażowane” są zaawansowane moduły tych systemów, dzięki którym możliwe jest Projektowanie Bazujące na Wiedzy (ang. *Knowledge-Based Design* – *KBD*). Moduły te wymagają jednak od użytkownika specjalistycznej wiedzy i zaopatrzenia się w dodatkowe licencje, które są dostępne w najbardziej zaawansowanych, a tym samym najdroższych systemach CAx, a ich zakup wiąże się z dodatkowymi opłatami. Implementacja opracowanej przez autora metodyki optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD jest możliwa w każdym systemie pozwalającym na projektowanie parametryczne i umożliwiającym użytkownikowi zastosowanie narzędzi programowych wykorzystanych w niniejszej pracy do tej optymalizacji.

Problem badawczy, jaki został poruszony w niniejszej rozprawie dotyczy sposobu, w jaki współczesne systemy CAD generują tworzoną przez użytkownika geometrię. Sposób ten w większości przypadków dopuszcza dwa rozwiązania, których uzyskanie nie jest przez niego w pełni kontrolowalne i wynika z tak zwanej orientacji danych wejściowych wykorzystywanych przy tworzeniu geometrii, czyli modelu 3D. Orientacja danych wejściowych uzależniona jest od ich zwrotu wektora, który może przyjmować jeden z dwóch przeciwnych kierunków. Końcowa postać modelu 3D uzależniona jest od zwrotu wektora wszystkich danych wejściowych wykorzystanych do jego wygenerowania, w wyniku czego geometria taka nazywana jest geometrią **zorientowaną**.

W związku z powyższym realizacja badań w kierunku rozwiązania przedstawionego problemu badawczego wiąże się z rozwiązaniem następujących problemów szczegółowych:

- wyeliminowanie dwuznaczności geometrycznej będącej następstwem zorientowanej natury generowanych we współczesnych systemach CAD modeli 3D, biorąc pod uwagę przyjęte kryteria wyboru,
- zdefiniowanie uniwersalnych procedur konstrukcyjnych, mających na celu eliminację dwuznaczności geometrycznej, dających się zastosować w jak największej liczbie rodzajów tworzonej geometrii,
- wykorzystanie w zdefiniowanych uniwersalnych procedurach konstrukcyjnych tylko narzędzi programowych wybranego systemu CAD – bez użycia zaawansowanych modułów charakterystycznych dla Projektowania Bazującego na Wiedzy (ang. *Knowledge-Based Design* – *KBD*),
- umożliwienie zaimplementowania zdefiniowanych procedur konstrukcyjnych do już istniejących topologii modeli CAD – bez konieczności ich przebudowy.

Autor proponowaną metodykę nazwał **Modelowaniem Jednoznacznym** (ang. *Unambiguous Modeling*), dzięki któremu możliwe stało się przeprowadzanie procesu optymalizacji struktury asocjatywnych modeli 3D przy użyciu prostych i ogólnodostępnych środków systemów CAD, by w konsekwencji zwiększyć możliwości zastosowania ich zaawansowanych narzędzi programowych umożliwiających Projektowanie Bazujące na Wiedzy i zbliżyć się do uzyskania w pełni zautomatyzowanego procesu projektowo-konstrukcyjnego tych modeli.

Należy zwrócić uwagę, że opisane autorskie rozwiązanie powyższego problemu badawczego jest proste, ale nieoczywiste, co w opinii autora powinno wzbudzić tym większe zainteresowanie wśród sfery inżynierskiej i naukowej oraz skłonić te sfery do refleksji nad dotychczasową „drogą rozwoju” współczesnych systemów klasy CAx.

### 1.3 Cel rozprawy

Celem niniejszej rozprawy jest przedstawienie nowej, skutecznej metodyki optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD, dzięki której możliwe jest wyeliminowanie dwuznaczności geometrycznej tych modeli bez potrzeby wykorzystania zaawansowanych modułów systemów CAD. Wyeliminowanie dwuznaczności geometrycznej oznacza zapewnienie stabilności topologicznej i geometrycznej modelu 3D podczas jego transformacji geometrycznych, niezamierzonej zmiany orientacji jego danych wejściowych, czy też podmiany jego danych wejściowych. Implementacja autorskiej metodyki Modelowania Jednoznacznego do topologii modelu 3D polega na zastosowaniu dwóch uniwersalnych Procedur:

- **Procedury Neutralności** – mającej na celu utworzenie neutralnej, w odniesieniu do lokalizacji w przestrzeni rozpatrywanego modelu 3D i innych modeli znajdujących się w tej przestrzeni, geometrii w postaci lokalnego układu współrzędnych,
- **Procedury Jednoznacznosci** – mającej na celu utworzenie jednoznacznie geometrycznych danych wejściowych wykorzystanych w topologii rozpatrywanego modelu 3D.

Autor poruszając w tej rozprawie tematykę pragnie zwrócić uwagę sfery inżynierskiej i naukowej na wpływ zastosowanych technik modelowania, dzięki którym konstruktor jest w stanie w bezpośredni sposób wpłynąć na pomyślną realizację procesu projektowo-konstrukcyjnego przyszłego wytworu. Wiedza z zakresu efektywnego wykorzystania rekomendowanych w niniejszej pracy technik tworzenia modeli CAD, jak i wykorzystania autorskiej techniki Modelowania Jednoznacznego ma bowiem kluczowe znaczenie w tym procesie, biorąc pod uwagę nakład pracy jaki konstruktor wykonuje podczas tworzenia i modyfikowania tych modeli. Tym samym autor proponowaną metodyką optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD sygnalizuje, że istnieje możliwość uzyskiwania tej struktury w sposób powtarzalny i kontrolowalny pod względem topologicznym, wykorzystując do tego celu tylko podstawowe funkcjonalności systemów CAD. Zachęca zatem czytelnika do powrotu do podstaw komputerowego wspomagania projektowania, tak by w konsekwencji móc w pełni wykorzystać potencjał drzemący w zaawansowanych funkcjonalnościach tych systemów.

### 1.4 Tezy rozprawy

Mając na uwadze przedstawiony problem badawczy oraz zdefiniowany cel rozprawy, sformułowano następujące tezy tej rozprawy:

**Teza 1:** Jednoznaczne zdefiniowanie orientacji danych wejściowych modelu CAD, jego podmiotu lub dowolnej jego operacji modelowania zapewnia stabilność topologiczną i geometryczną podczas jego transformacji geometrycznych.

**Teza 2:** Podmiana danych wejściowych modelu CAD, jego podmiotu lub dowolnej jego operacji modelowania w ramach przyjętych kryteriów wyboru może mieć bezpośredni wpływ na błędną interpretację przez system CAD jego topologii.

**Teza 3:** Każda metodyka tworzenia topologii modelu CAD lub jego podmiotu zapewnia jego stabilność geometryczną, jeśli orientacja danych wejściowych tej topologii jest zdefiniowana w sposób jednoznaczny.

**Teza 4:** Rodzaj wybranej metodyki tworzenia topologii modelu CAD lub jego podmiotu ma pomijalny wpływ na czas potrzebny na aktualizację tej topologii, jeśli orientacja danych wejściowych tej topologii jest zdefiniowana w sposób jednoznaczny.

### 1.5 Zakres rozprawy

Niniejsza rozprawa została podzielona na sześć Rozdziałów, obejmujących następujące zagadnienia:

Rozdział 1 – Ogólny opis problemu badawczego i celu podjętych badań. Sformułowanie tez i zakresu rozprawy.

Rozdział 2 – Historia Systemów CAD z podziałem na jego:

- genezę – opis „narodzin” systemów komputerowego wspomagania projektowania; opis okoliczności, które umożliwiły ich rozwój i w jaki sposób wpłynęły na dalszy rozwój przemysłu, w którym znalazły swój początek,
- pionierów – opis trzech osobowości mających, zdaniem autora, największy wpływ na rozwój systemów CAD (Patrick J. Hanratty, Douglas T. Ross, Ivan E. Sutherland),
- integrację – opis okoliczności połączenia systemów CAD i CAM, a także ich integracji w jedną grupę systemów komputerowego wspomagania projektowania CAx.

Rozdział 3 – Opis technik tworzenia modeli 3D w Modelowaniu Jednoznacznym z uwzględnieniem:

- ich podziału na techniki wchodzące w bezpośredni i pośredni skład Modelowania Jednoznacznego,
- genezę modeli CAD uzyskiwanych dzięki tym technikom (Modele 2D, Modele Krawędziowe, Modele Powierzchniowe, Modele Bryłowe, Modele Hybrydowe),
- przedstawieniu trzech technik wchodzących w bezpośredni skład Modelowania Jednoznacznego (Modelowanie w oparciu o Cechy Geometryczne, Modelowanie Poziome, Modelowanie Wieloobiektowe).

Rozdział 4 – Opis autorskiej metodyki Modelowania Jednoznacznego z uwzględnieniem:

- opisu konsekwencji zastosowania geometrii zorientowanej w systemach CAD,
- opisu badań nad definiowaniem jej wytycznych (Procedura Jednoznaczności i Procedura Neutralności),
- opisu badań jej implementacji do topologii modelu CAD,
- opisu badań jej implementacji do innych badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD.

Rozdział 5 – Przedstawienie wyników badań implementacji Modelowania Jednoznacznego do topologii modelu CAD oraz do innych badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD.

Rozdział 6 – Podsumowanie i wnioski odnoszące się do przeprowadzonych badań oraz postawionych tez niniejszej rozprawy.



## 2 Historia Systemów CAD

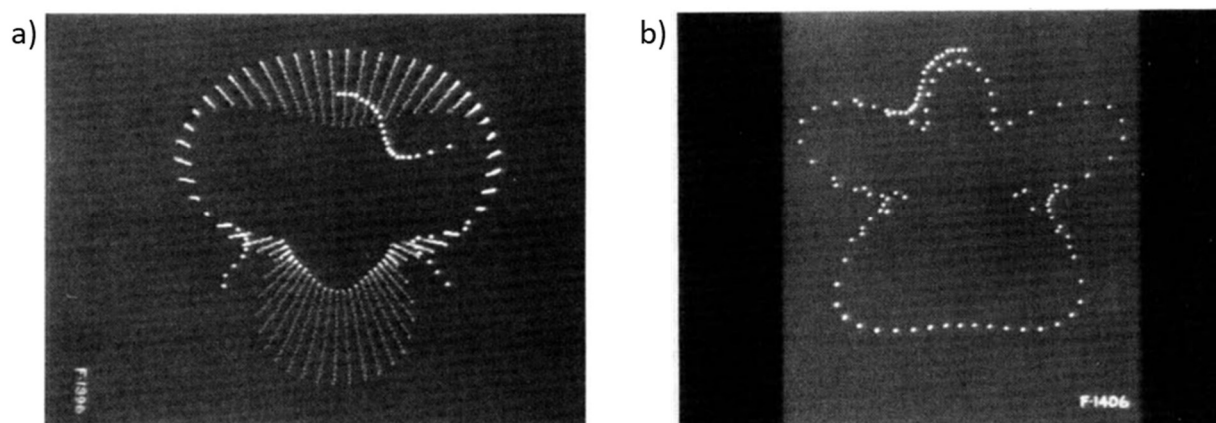
### 2.1 Geneza komputerowego wspomaganie projektowania CAD

Początek komputerowego wspomaganie projektowania datowany jest umownie na 1 grudnia 1959 roku, kiedy to amerykański Instytut Technologii w Massachusetts MIT (ang. *Massachusetts Institute of Technology*), pod patronatem Działu Metod Wytwarzania Sił Powietrznych Stanów Zjednoczonych (ang. *Manufacturing Methods Division, Air Material Command of the United States Air Force*), rozpoczął oficjalne badania w kierunku możliwości jakie niesło za sobą połączenie „człowiek-maszyna”, a więc wykorzystania komputera do wspierania prac inżynierskich. Przedsięwzięcie zakrojone było na szeroką skalę, w którym udział wzięły dwa niezależne zespoły:

- 1) Grupa Do Spraw Zastosowań Komputerowych będąca częścią Laboratorium Systemów Elektronicznych (ang. *Computer Applications Group of the Electronic Systems Laboratory*),
- 2) Zakład Projektowania i Grafiki Wydziału Inżynierii Mechanicznej (ang. *Design and Graphics Division of the Mechanical Engineering Department*) [41].

Nie była to jednak pierwsza próba wykorzystania komputera do procesu projektowania. W dniach od 31 lipca do 4 sierpnia 1989 roku w Boston odbyła się konferencja SIGGRAPH: „Retrospektywy: Wczesne lata grafiki komputerowej na MIT, Lincoln Lab i Harvardzie” (ang. *Retrospectives: The Early Years in Computer Graphics at MIT, Lincoln Lab and Harvard*), w której udział wzięli pionierzy grafiki komputerowej z wyżej wymienionych instytucji naukowych (MIT, Lincoln Lab, Harvard). Podczas szeregu paneli dyskusyjnych przedstawione zostały początki komputerowego wspomaganie tworzenia grafiki, a jednym z prelegentów był Norman Taylor – absolwent MIT i pracownik Lincoln Lab, będący członkiem zespołu pracującego nad pierwszym elektronicznym komputerem cyfrowym *Whirlwind* [39]. Norman Taylor tak wspominał czasy pierwszych prób tworzenia wzorów graficznych na ekranie komputera *Whirlwind*:

„...*To może być pierwszy program do wyświetlania, jaki kiedykolwiek napisano. Było to w 1949 roku. Wkrótce potem student Dom Combelec zdecydował się wykorzystać komputer Whirlwind do projektowania. Jego szczególnym zainteresowaniem było rozmieszczenie anten, aby utworzyć dowolny układ wzorów. W następnej kolejności mógł on zmieniać położenie tych anten, aby znaleźć żądany wzór. Ten obraz przedstawia proces poszukiwania rozwiązania (rys. 1a); następny obraz przedstawia rozwiązanie, którego szukał (rys. 1b). Tak więc w 1950 roku było jasne, że interaktywne wyświetlacze są prawdziwym narzędziem do łączenia ludzi z komputerami, jednak otrzymanie wystarczającej szybkości tego łączenia i uzyskanie wymaganego czasu reakcji było trudne do wykonania i kosztowne [31]”.*



Rys. 1. Pierwsze wykorzystanie komputera do procesu projektowania: a) proces poszukiwania rozwiązania, b) poszukiwane rozwiązanie [31]

Wprawdzie nie było jeszcze wtedy mowy o komputerowym wspomaganie projektowania – w dzisiejszym rozumieniu, ale przesłanki do zaistnienia takowego już w tamtym czasie zaczęły się pojawiać. Faktyczne źródła rozwoju systemów CAD pojawiły się w latach 60-tych i wyniknęły z potrzeby wsparcia trzech odrębnych procesów projektowych:

- procesu projektowo-konstrukcyjnego,
- procesu symulacji inżynierskich,
- procesu wytwarzania.

### **Wsparcie procesu projektowo-konstrukcyjnego**

Pierwszym i jednocześnie głównym źródłem rozwoju systemów CAD była potrzeba wsparcia konstruktorów w przygotowaniu dokumentacji projektowo-konstrukcyjnej. Inżynierowie-programiści opracowując pierwsze systemy CAD, o których szerzej wspomniano w punkcie 2.2 Rozdziału 2 niniejszej pracy wykazali, że komputer może stanowić realną pomoc dla konstruktora, wyręczając go w najbardziej czasochłonnych pracach związanych z przygotowaniem, weryfikowaniem i modyfikowaniem rysunków technicznych. Największą tego zasługą okazały się możliwości komputera w kwestii automatyzacji czynności, które w konwencjonalnej technice spoczywały na człowieku, takich jak powielanie elementów rysunku czy łączenie kilku fragmentów rysunku w całość oraz w kwestii zdolności do przypisywania dodatkowych atrybutów poszczególnym podmiotom rysunków, takich jak wymiary czy cechy geometryczne.

### **Wsparcie procesu symulacji inżynierskich**

Proces symulacji inżynierskich jest procesem, którego źródła sięgają czasu na długo przed rozpoczęciem prac nad systemami CAD. Pierwsza publikacja o tej tematyce miała miejsce już w 1941 roku, w której rosyjski inżynier Alexander Hrennikoff przedstawił matematyczną metodę obliczania naprężeń ciał stałych bazującą na siatce elementów liniowych składającej się z prętów i belek [16]. Przez kolejne lata metoda ta ewoluowała stając się w istocie pierwszą dziedziną komputerowego wspomaganie prac inżynierskich, a w 1960 roku za sprawą amerykańskiego inżyniera Raya Clough'a otrzymała nazwę stosowaną do dziś – Metoda Elementów Skończonych MES (ang. *Finite Element Method – FEM*) [8]. Typowe obszary wykorzystania Metody Elementów Skończonych obejmują analizę strukturalną, wymianę ciepła, przepływ płynów, transport masy i potencjał elektromagnetyczny [28].

Wykonywanie na bazie tej metody symulacji inżynierskich stało się bodźcem do dalszego rozwoju systemów CAD, czego efektem była ich zdolność do generowania na ekranie komputera trójwymiarowej geometrii. Zrodziło to zupełnie nowe możliwości w omawianych procesach i potwierdziło realne korzyści wynikające z ich stosowania. Możliwe było ograniczenie do niezbędnego minimum przygotowywania fizycznych prototypów i przeprowadzania na nich prób i testów, bo większość prac odbywała się w obrębie systemu CAD. Symulacje kinematyczne modeli 3D z kolei pozwalały na projektowanie zautomatyzowanych i zrobotyzowanych linii produkcyjnych zanim zostały rozpoczęte jakiegokolwiek prace fizyczne (oszczędność czasu, pieniędzy i potencjalnych problemów). Dla samych konstruktorów przejście z dwuwymiarowej dokumentacji do modeli 3D stało się nieocenionym ułatwieniem, ponieważ nie musieli oni składać już poszczególnych rzutów i widoków rysunku 2D próbując wyobrazić sobie jaki element reprezentują. Zamiast tego, mając model 3D tego samego elementu, widzieli natychmiast jak on może wyglądać w rzeczywistości, mając dodatkowo do dyspozycji szereg funkcjonalności pozwalających na łatwiejszą, dalszą pracę [33].

W tym miejscu warto dodać, że przeanalizowana przez autora literatura nie podaje zgodnej klasyfikacji systemów do przeprowadzania symulacji inżynierskich. Przykładowo August-Wilhelm Scheer (Niemcy) w swojej książce *CIM Computer Integrated Manufacturing – Towards the Factory of the Future* przypisuje je do systemów komputerowego wspomaganie prac inżynierskich CAE (ang. *Computer Aided Design*):

*„Rozległe metody obliczeniowe (Metoda Elementów Skończonych, symulacja obciążenia itp.) określane są terminem Computer Aided Engineering CAE [43]”.*

W podobny sposób wypowiadają się Hiroshi Toriya (Japonia) i Hiroaki Chiyokura (Japonia) w książce *3D CAD Principles and Applications*:

*„CAE można zdefiniować jako podejście inżynierskie do procesów rozwoju produktu, takich jak projektowanie i produkcja. Innymi słowy, system CAE ma na celu sprawdzenie poprawności projektu podczas opracowywania produktu i zredukowanie roboczodni produkcji poprzez zastosowanie modeli matematycznych na etapie projektowania i produkcji [55]”.*

Inne podejście do klasyfikacji symulacji inżynierskich przedstawiają przykładowe publikacje, w których CAE jest terminem zawierającym w sobie CAD oraz inne techniki komputerowego wspomaganie. Natomiast symulacje inżynierskie traktowane są między innymi jako część systemów CAD:

Edward Chlebus (Polska) *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*:

*„CAE – Komputerowe wspomaganie prac inżynierskich – pojęcie często uogólniane na wszystkie techniki CAx, przy czym zazwyczaj rozumiane jako techniki wspomagające prace inżyniera w pierwszych fazach rozwoju produktu, tj. w pracach projektowo-konstrukcyjnych. Zatem do CAE zalicza się na ogół CAD wraz z FEM oraz narzędzia CAS (ang. Computer Aided Simulation) [7]”.*

A. J. Medland (Wielka Brytania), Piers Burnett (Wielka Brytania) *CAD/CAM in Practice: A Manager's Guide to Understanding and Using CAD/CAM*:

*„W celu przeanalizowania i przetestowania tych cech charakterystycznych projektu, które nie są zdefiniowane jego własną geometrią – na przykład odporność na naprężenia czy właściwości termiczne – konieczne jest zasymulowanie pozostałych aspektów rzeczywistości. Możliwości CAD w tym zakresie rozszerzają się bardzo szybko [33]”.*

T. Winkler (Polska) *Wspomaganie Komputerowe CAD/CAM – Komputerowy zapis konstrukcji*:

„CAE (ang. *Computer Aided Engineering*) odnosi się do całości zabiegów wspomagających w procesach: projektowo-konstrukcyjnych i przygotowania wytwarzania [67]”.

W związku z powyższymi niejasnościami autor zdecydował się sięgnąć do własnych doświadczeń zawodowych bazujących na współpracy z wieloma międzynarodowymi zespołami (Europa, USA, Azja), z których wynika, że CAE zawsze oznacza odrębny dział danej firmy, a jego pracownicy są niezależni od pracowników działu CAD, ale pozostają z nimi w bliskiej kooperacji, zajmując się przy tym tylko symulacjami inżynierskimi. Dlatego też w dalszej części niniejszej pracy komputerowe wspomaganie prac inżynierskich (CAE) będzie odnosiło się tylko do tej właśnie dziedziny.

### **Wsparcie procesu wytwarzania**

Trzecim źródłem rozwoju systemów CAD była chęć przyspieszenia przepływu informacji w przedsiębiorstwie z działów projektowych do produkcyjnych poprzez bezpośrednie wykorzystanie modeli 3D w sterowaniu numerycznym NC obrabiarek (ang. *Numeric Control*) [57]. Następstwem tego było przekształcenie sterowania numerycznego w jego komputerowo wspomaganą formę – DNC (ang. *Direct Numeric Control*) i CNC (ang. *Computer Numeric Control*) [23]. To z kolei pociągnęło za sobą utworzenie połączenia między CAD, a komputerowym wspomaganie wytwarzania CAM (ang. *Computer Aided Manufacturing*) tworząc tym samym skrót CAD/CAM [4]. Zapewniona dzięki temu ciągłość między projektowaniem, a wytwarzaniem sprawiła, że od tego momentu były to dwie sfery jednego procesu, a nie tak jak wcześniej – dwa oddzielne procesy. Koncepcja przenikania się tych dwóch sfer w obrębie jednego procesu zapewniła ciągły przepływ informacji w obu kierunkach między działem projektowym, a działem produkcyjnym, przy czym ich proporcjonalny udział nie był taki sam dla każdego projektowanego wytworu. W jednym przypadku CAM mogło stanowić większość prac związanych z procesem wytwarzania; w innym przypadku było odwrotnie – CAD przeważało i stanowiło główną jego część. Co więcej, wraz z postępem technologicznym w przemyśle granica ta musiała być coraz częściej przesuwana tak, by zwiększyć rolę CAD, a główny na to wpływ miały następujące czynniki:

- coraz większy stopień skomplikowania geometrycznego wytworów, a co za tym idzie coraz większe wymagania co do precyzji ich wytwarzania,
- dążenie człowieka do powielania wytworów, a więc do rozwoju produkcji wielkoseryjnej,
- dążenie człowieka do automatyzacji procesu produkcyjnego, która w większym stopniu wymagała zaangażowania komputerowego wspomaganie projektowania w proces przygotowania programów wprowadzanych do zautomatyzowanych obrabiarek NC [33].

Nietrudno też sobie wyobrazić, że w związku z powyższymi zmianami w temacie omawianego procesu rola konstruktora w zauważalny sposób się zwiększyła.

Wsparcie procesu wytwarzania poprzez zastosowanie systemów CAD i scalenie ich z systemami CAM usprawniło funkcjonowanie konwencjonalnego sterowania numerycznego NC i w zauważalny sposób wpłynęło na efektywność tego procesu. Pierwotnie bowiem owo konwencjonalne sterowanie wprowadzone na początku lat 50-tych mimo, że niewątpliwie poszerzyło ludzkie możliwości w dziedzinie wytwarzania wytworów, to nie było rozwiązaniem pozbawionym niedoskonałości. Wprawdzie opracowany w 1958 roku język programowania APT do obrabiarek NC, o którym szerzej w punkcie 2.2 Rozdziału 2 niniejszej pracy, przyniósł zauważalny wzrost wydajności produkcyjnej, to jednak rozwiązanie to nie eliminowało głównych przyczyn powstawania w nim pomyłek i błędów. Przyczyny te wynikały z konieczności



zatrudniania dodatkowych operatorów – programistów, którzy stojąc na drodze między konstruktorem, a końcową fazą procesu wytwarzania, byli odpowiedzialni za utworzenie programu NC i przetworzenie go na taśmę lub kartę perforowaną kompatybilną z jednostkami sterującymi obrabiarek NC. Początkowe dane geometryczne konstruktora były więc dwukrotnie konwertowane co sprawiało, że jego kontrola nad procesem NC była ograniczona, zwłaszcza że programista musiał mieć pewien stopień swobody przy tworzeniu programu, więc końcowe dane mogły się różnić od tych początkowych. Na tym wady konwencjonalnego sterowania numerycznego niestety się nie kończyły. Etap tworzenia programu NC i konwertowania go na taśmę perforowaną, mimo zastosowania języka APT, był w dalszym ciągu czasochłonny i pracochłonny nawet dla prostego geometrycznie elementu. Operator obrabiarki poprzez zakodowany program na taśmie perforowanej „na ślepo” uwzględniał, dla różnych kombinacji narzędzi i materiałów, rozmaite warunki brzegowe, takie jak: odsunięcie narzędzia od obrabianego elementu, pozycje zacisków ustalających, prędkość skrawania, szybkość posuwu. Warunki te były rewidowane dopiero podczas pierwszego uruchomienia taśmy na obrabiarce. W przypadku wystąpienia błędu etap tworzenia taśmy trzeba było powtarzać, czasem wielokrotnie, dążąc do uzyskania właściwych rezultatów na zasadzie metody „prób i błędów”. Wszystko to powodowało, że techniki NC były opłacalne tylko wtedy, gdy środki wydane na proces tworzenia programu mogły być rozłożone na wielkoseryjną produkcję lub gdy wymagana była wysoka precyzja geometryczna obrabianego elementu nieosiągalna innymi technikami. Wprowadzenie systemów CAD/CAM i wykorzystanie modeli 3D w procesie wytwarzania eliminowało powyższe niedoskonałości konwencjonalnego sterowania numerycznego. Dodatkowi operatorzy stojący wcześniej na linii między konstruktorem, a końcową fazą procesu wytwarzania zostali zastąpieni przez komputer. Oczywiście w dalszym ciągu wymagane było wprowadzanie do systemu wcześniej wspomnianych warunków brzegowych. Doszedł też dodatkowy proces przetwarzania końcowego (ang. *postprocessing*) przygotowanego programu elementu do formy zrozumiałej dla czytników taśm perforowanych i w dalszym ciągu nad procesem tym czuwał człowiek – programista. Najważniejszym jednak był fakt, że etapy generujące największą liczbę pomyłek i błędów w konwencjonalnym NC zostały „przejęte” przez niezawodne, przewidywalne i powtarzalne w swoim działaniu komputery zapoczątkowując tym samym w latach 70-tych erę komputerowo wspomaganego sterowania numerycznego. Dzięki wykorzystaniu modeli 3D wyeliminowano etapy przekazywania danych „z rąk do rąk”, co umożliwiło zachowanie ich integralności w całym procesie DNC/CNC, a sam program obrabianego elementu przestał być zrozumiały tylko dla ekspertów. Konstruktor poprzez system CAD mógł od tej pory wyświetlić geometryczną postać elementu, ale również ścieżkę narzędzia, którą to narzędzie wykonywało podczas obróbki. Funkcjonalność ta pozwalała mu na śledzenie kolejnych faz wytwarzania elementu i reagowania na ewentualne powstałe przeszkody jeszcze na etapie wirtualnego modelu, a nie tak jak wcześniej – na etapie produkcyjnym.

Wsparcie procesu wytwarzania poprzez implementację systemów CAD i przekształcenie sterowania numerycznego do postaci DNC i CNC nie było oczywiście pozbawione niedoskonałości. Przykładowo, sterowanie DNC w swej strukturalnej złożoności sprawiało, że jego implementacja oznaczała dla przedsiębiorstwa znaczne koszty i gruntowne zmiany w dotychczas przyjętej filozofii tworzenia wytworów. CNC natomiast nie obciążające finansowo i nie angażujące infrastrukturalnie przedsiębiorstwo, tak jak DNC, charakteryzowało się mniejszą wydajnością obliczeniową wynikającą z zastosowania bardziej kompaktowego, ale przy tym tańszego w porównaniu z DNC, sprzętu komputerowego. Jednak już w latach 80-tych jasnym stało się, że te dwie technologie, poprzez starania inżynierów, będą się wzajemnie przenikały dążąc do

pewnego rodzaju hybrydyzacji i uzyskania kompromisu w postaci jednego skondensowanego w formie, jak i wystarczająco wydajnego obliczeniowo rozwiązania. Było to z kolei jedną z przesłanek wykrystalizowania się zapoczątkowanej jeszcze w latach 70-tych przez Josepha Harringtona idei Komputerowo Zintegrowanego Wytwarzania CIM (ang. *Computer Aided Manufacturing*) [15] będącej formą organizacji przedsiębiorstwa, w którym podstawą efektywnego funkcjonowania była racjonalna i płytka struktura przepływu informacji oraz związane z nią, zintegrowany przez strukturę produktu i procesów, model danych [7].

### Podsumowanie

Opisany we wspomnianych źródłach rozwój systemów CAD sprawił, że natura geometrycznych modeli 3D stała się fundamentalną dla właściwie wszystkich aspektów technik CAD/CAM/CAE i bardziej niż jakikolwiek inny czynnik była odpowiedzialna za ich przewagę w stosunku do konwencjonalnych technik stosowanych w wytwarzaniu wytworów [33]. Należy mieć też na uwadze fakt, że komputerowo wspomagany proces projektowo-konstrukcyjny był ściśle związany i uzależniony od sprzętu komputerowego, którego równoległy rozwój umożliwił globalną popularyzację systemów CAD/CAM/CAE w przemyśle. Paradoksalnie, mimo że CAD nie był pierwszym powstałym systemem komputerowego wspomaganie, to stał się on pierwszym w hierarchii ważności wśród istniejących już wtedy systemów CAM i CAE, jak i wśród innych później utworzonych systemów, o których szerzej w punkcie 2.3 Rozdziału 2 niniejszej pracy, ponieważ to na jego podstawie przygotowywane były prace związane z wytwarzaniem, symulacjami inżynierskimi i innymi pracami związanymi z procesem produkcyjnym. Globalna ekspansja i dynamiczny rozwój systemów CAD były zatem w dużym stopniu wynikiem zaistniałej potrzeby ich implementacji w tych środowiskach.

### 2.2 Pionierzy komputerowego wspomaganie projektowania CAD

Tak jak wspomniano w Rozdziale 1 niniejszej pracy, do rozwoju komputerowego wspomaganie projektowania przyczyniło się wielu znakomitych inżynierów i naukowców, których dorobek w dalszym ciągu wykorzystywany jest we współczesnym oprogramowaniu. W latach 50-tych ubiegłego stulecia, czyli w początkach ery komputerów, w wielu ośrodkach na świecie prowadzono równolegle intensywne prace nad przygotowaniem matematycznego opisu krzywych i powierzchni, w których uczestniczyło wielu konstruktorów – Ferguson (*Boeing*), de Boor i Gordon (*General Motors*), Coons (*Massachusetts Institute of Technology*), Sabin (*British Aircraft Corporation*), de Casteljaou (*Citroen*), Bézier (*Renault*) i wielu innych. Rezultaty ich pracy stały się podstawą modelowania powierzchniowego w dzisiejszych systemach CAD, a wcześniej CAGD (ang. *Computer Aided Geometric Design*) [62]. Podobnie w przypadku modelowania bryłowego, którego jednym z fundamentów stało się dzieło angielskiego matematyka i fizyka Georga Boole'a w postaci nowego podejścia w dziedzinie matematycznej zajmującej się strukturami algebraicznymi [3]. Techniki tworzenia modeli 3D wykorzystywane w oprogramowaniu wspierającym konstruowanie zostały szerzej omówione w Rozdziale 3 niniejszej pracy. Z uwagi na jej tematykę, autor zdecydował się skupić uwagę czytelnika na trzech osobach, które w bezpośredni sposób przyczyniły się do rozwoju i popularyzacji systemów CAD, jak i CAM.

#### Patrick J. Hanratty

Doktor Patrick Hanratty był przykładem osoby, która mimo początkowego braku spektakularnych sukcesów swoich badań i twórczości była w stanie przebić się ze swoimi pomysłami do szerokiego

grona odbiorców. Finalnie, wpływ jego pracy na branżę przemysłową był na tyle znaczący, że niektóre jego rozwiązania w tematyce matematycznych algorytmów są stosowane w systemach CAD/CAM do chwili obecnej, a on sam uważany jest za „ojca systemów CAD/CAM”.

Jego pierwszym dziełem był utworzony w 1957 roku system PRONTO, za pośrednictwem którego programiści generowali zestawy instrukcji zapisywanych na taśmach perforowanych definiując w ten sposób ruchy narzędzi obrabiarek sterowanych numerycznie (NC). PRONTO stało się pierwszym komercyjnym tego typu oprogramowaniem wykorzystanym przez firmę General Electric. W 1962 roku Hanratty rozpoczął współpracę z firmą General Motors, w której został zaangażowany w rozwój systemu DAC (ang. *Design Automated by Computers*) posiadającego między innymi funkcjonalności pozwalające na przygotowanie konstrukcji, jak i procesu produkcyjnego wytworu. Zatem system ten łączył dwie dziedziny: komputerowego wspomaganie projektowania jak i wytwarzania – CAD/CAM. Niestety ambitne plany utworzenia: zintegrowanego środowiska łączącego w sobie CAD/CAM, systemu operacyjnego, języka programowania z kompilatorem, bazy danych, skanera rysunków technicznych oraz jednostki wykonującej dodatkowe obliczenia matematyczne, okazały się zbyt wielkim zobowiązaniem nawet dla tak dużego przedsiębiorstwa. Wynikiem tego było wydanie w 1967 roku oświadczenia ówczesnego zarządu General Motors o zawieszeniu dalszych prac rozwojowych nad DAC [24]. W 1970 roku Hanratty założył firmę ICS, której celem był dalszy rozwój i sprzedaż systemów CAD/CAM. Jednak przedsięwzięcie to zakończyło się porażką, gdyż promowane oprogramowanie nie było kompatybilne z powszechnie dostępnym w tamtym czasie sprzętem komputerowym. Dodatkowo nie pomógł fakt, że w oprogramowaniu tym wykorzystano autorski język TPL – zawężając grono potencjalnych nabywców jeszcze bardziej. Pomimo błędów i potknięć biznesowych Hanratty wyciągnął wnioski z poprzednich niepowodzeń i w 1971 roku założył kolejną firmę MCS (ang. *Manufacturing and Consulting Services*), by odnieść globalny sukces, a w konsekwencji odcisnąć piętno i zapisać się na kartach historii systemów CAD/CAM. Na ten sukces złożyły się oferowane przez firmę produkty zaprojektowane, by współpracować praktycznie z każdym dostępnym wtedy komputerem i zaprogramowane w powszechnie znanym języku FORTRAN [19]. Oferowane systemy takie jak ADAM czy AD-2000 licencjonowane były firmom z całego świata między innymi United Computing (system Unigraphics – dziś znany jako NX), NASA czy Caterpillar.

W 2010 roku Patrick Hanratty udzielił wywiadu stowarzyszeniu non-profit SME zrzeszającemu profesjonalistów, nauczycieli i studentów zaangażowanych w promowanie i wspieranie przemysłu wytwórczego. Zapytany o przyszłość systemów CAD w kontekście coraz wyższych wymogów dotyczących precyzji wytwarzania, zwłaszcza w przemyśle lotniczym/wojskowym, Hanratty odpowiedział:

*„...To co jest potrzebne to jądro systemowe CAD modelowania powierzchniowego/bryłowego, które będzie funkcjonowało w zasięgu wszystkich głównych systemów CAD i CAM oferując podwójną precyzję wejściową i wyjściową z całym przetwarzaniem w precyzji poczwórnej i efektywnie nieograniczonym rozmiarem obiektu, np. łączenie dwóch powierzchni swobodnych, każdych o długości 100 metrów, z mikronową tolerancją [58]”.*

### **Douglas T. Ross**

Znaczącą rolę w rozwoju komputerowego wspomaganie projektowania odegrał również amerykański naukowiec Douglas T. Ross, który już w 1954 roku napisał pierwszy program pozwalający na wprowadzanie danych do komputera w postaci ręcznie wykonywanych rysunków

na jego ekranie [31]. Wprowadzanie to odbywało się za pomocą wskaźnika – „działa świetlnego”, którego rezultatem były punkty świetlne widoczne na ekranie wspomnianego już komputera *Whirlwind*. Pierwotnie owe „działa świetlne” były częścią opracowywanego w tamtym czasie systemu komputerowej obrony powietrznej Stanów Zjednoczonych SAGE (ang. *Semi-Automatic Ground Environment*), mającego na celu wykrywanie obiektów w przestrzeni powietrznej na dużym obszarze. Jego oficjalne uruchomienie odbyło się dopiero w 1958 roku [42]. Oficerowie Amerykańskich Sił Powietrznych będący operatorami systemu SAGE posługiwali się nimi w celu identyfikowania pojawiających się na ekranie punktów świetlnych i kategoryzowania ich jako obiekty wojskowe, w domyśle będące potencjalnym zagrożeniem, lub jako inne. Przełomowym w dokonaniu Rossa było wykorzystanie wskaźnika w postaci „pióra” do „rysowania po ekranie” komputera, a pierwszą tego próbą było napisanie jego imienia. D. Ross na konferencji SIGGRAPH w taki sposób skomentował to wydarzenie:

*„Więc to jest to co właściwie się rozpoczęło – jak sądzę – wejście grafiki komputerowej do ogólnego użytku [31]”.*

Kolejnym wkładem w rozwój komputerowego wspomaganie projektowania poczynionym przez Rossa był jego autorski język programowania APT (ang. *Automatically Programmed Tool*), którego dopracowana wersja ujrzała światło dzienne w 1958 roku i który był przeznaczony dla sterowania numerycznego NC [5]. Język ten pozwalał skrócić proces przetwarzania danych zawartych na rysunkach technicznych do postaci komend zrozumiałych dla obrabiarek numerycznych. Wcześniej proces ten był wykonywany przy użyciu konwencjonalnych urządzeń, na przykład kalkulatorów, przez wyznaczonych do tego celu operatorów. W bardzo niewielu przypadkach operator mógł się wspomóc mocą obliczeniową komputera. Wraz z zastosowaniem APT na miejscu operatora pojawił się programista, którego zadaniem było zapisanie informacji zawartych na rysunkach do postaci instrukcji opisujących geometrię obrabianego elementu, jak i tor ruchu narzędzia obrabiarki. Tak zapisane instrukcje trafiały do jeszcze jednej osoby odpowiedzialnej tym razem za utworzenie na ich bazie karty perforowanej, która to z kolei, poprzez czytnik kart i jednostkę sterującą, sterowała ruchem narzędzia obrabiarki.

D. Ross jest ponadto uważany za twórcę sformułowania *Computer Aided Design (CAD)*, którą zaproponował będąc członkiem zespołu pracującego nad wcześniej przytoczonymi badaniami w kierunku możliwości, jakie niesło za sobą połączenie „człowiek-maszyna” (rozpoczętymi 1 grudnia 1959 roku).

### **Ivan E. Sutherland**

W 1963 roku Ivan Sutherland przedstawił pracę doktorską na temat autorskiego „Systemu graficznej komunikacji człowiek-maszyna” (ang. *A man-machine graphical communication system*) – Sketchpad, opisując go jako nowe medium komunikacyjne między człowiekiem, a komputerem, zawierające w sobie wejściowe, wyjściowe i obliczeniowe programy pozwalające na interpretację informacji rysowanych bezpośrednio na ekranie komputera. Wprowadzanie informacji odbywało się za pomocą pióra świetlnego, które mogły przyjmować postać punktów, segmentów linii prostych, łuków okręgów oraz wcześniej zdefiniowanych symboli bazujących na tych punktach, segmentach i łukach. Zdefiniowany jako system ogólnego przeznaczenia, Sketchpad miał służyć do tworzenia rysunków elektrycznych, mechanicznych, naukowych, matematycznych, a nawet animowanych [48].

To, co czyniło dzieło Sutherlanda przełomowym były zawarte w nim nowatorskie funkcjonalności zaprogramowane w oparciu o algorytmy matematyczne w konsekwencji czyniące

go jednym z najbardziej wpływowych systemów komputerowych na branżę przemysłową i jednocześnie realnym wsparciem prac inżynierskich. Należy jednocześnie dodać, że podobieństwa Sketchpada do wcześniejszej pracy D. Rossa z 1954 roku wynikające z zastosowania tego samego środka do wprowadzania danych – wskaźnika świetlnego – nie były przypadkowe, gdyż Sutherland podczas swoich badań otrzymywał od Rossa wiele cennych rad i wskazówek, czego dowodem były specjalne podziękowania jakie Sutherland zamieścił w swojej rozprawie między innymi w jego kierunku. Sketchpad charakteryzował się:

- interaktywnym interfejsem, w skład którego wchodziło pióro świetlne i zestaw przycisków kontrolnych, za pośrednictwem których użytkownik mógł, poza wprowadzaniem danych, wykonywać transformacje rysowanego elementu, jak i poszczególnych jego cech geometrycznych, takie jak: usuwanie, przesuwanie, kopiowanie, skalowanie czy scalanie,
- zdolnością do tworzenia wysoce powtarzalnych i dokładnych rysunków w stosunkowo krótkim czasie,
- zdolnością do modyfikowania utworzonych wcześniej rysunków bez konieczności tworzenia ich od początku,
- zdolnością do dodawania do rysunku wcześniej przygotowanych symboli i szablonów np. mechanicznych czy elektrycznych,
- zdolnością do współpracy z ploterem umożliwiającym wydruk rysunków na papierze,
- zdolnością do tworzenia więzów geometrycznych: postaciowych i wymiarowych,
- zdolnością do tworzenia powiązań między cechami geometrycznymi rysowanego elementu, jak również między dodanymi do rysunku symbolami i szablonami (zmiana wzorca pociągała za sobą zmianę wszystkich jego kopii) [48].

Dwie ostatnie cechy w kontekście niniejszej pracy mają znaczenie priorytetowe. Zwłaszcza zdolność do tworzenia powiązań między cechami geometrycznymi elementu dla tytułowej metodyki optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD stanowi podstawowy jej aspekt. Termin „asocjatywność” w kontekście poruszanej tematyki jest bowiem niczym innym jak tworzeniem powiązań. Fakt znaczącej różnicy między samymi systemami, w których ta asocjatywność zachodzi jest w zasadzie pomijalna. Oczywiście rozwój technik tworzenia dokumentacji projektowo-konstrukcyjnej, jak i rozwój samych systemów CAD sprawił, że nadawanie więzów postaciowych i wymiarowych, czy tworzenie zależności topologicznych, jest dziś bardziej rozbudowane i oferuje więcej możliwości, niż funkcjonalność jaką oferował Sketchpad. Jej fundamenty pozostały jednak niezmiennie niezależnie od faktu, że dzieło Sutherlanda oferowało omawiane cechy w obrębie tworzenia rysunków 2D, podczas gdy niniejsza praca skupia się na tworzeniu modeli 3D. Warto natomiast w tym miejscu dodać, że rozwinięciem idei Sutherlanda był Sketchpad III, którego rozwojem zajął się Timothy Johnson. Johnsonowi w 1964 roku udało się wprowadzić do niego funkcjonalność tworzenia modeli 3D [18]. Temat samej asocjatywności został szerzej przedstawiony w Rozdziale 3 niniejszej pracy.

Sutherland w swoich badaniach dowiódł użyteczności Sketchpada dla następujących obszarów działań inżynierskich:

- wprowadzanie drobnych zmian w dokumentacji projektowo-konstrukcyjnej,
- zrozumienie naukowych lub inżynierskich operacji projektowanego elementu, które mogły być zapisane w postaci graficznej,
- wykorzystanie gotowych topologii schematów (np. obwodów elektrycznych) jako dane wejściowe do dalszych symulacji inżynierskich,
- tworzenie powtarzalnej dokumentacji projektowo-konstrukcyjnej [48].

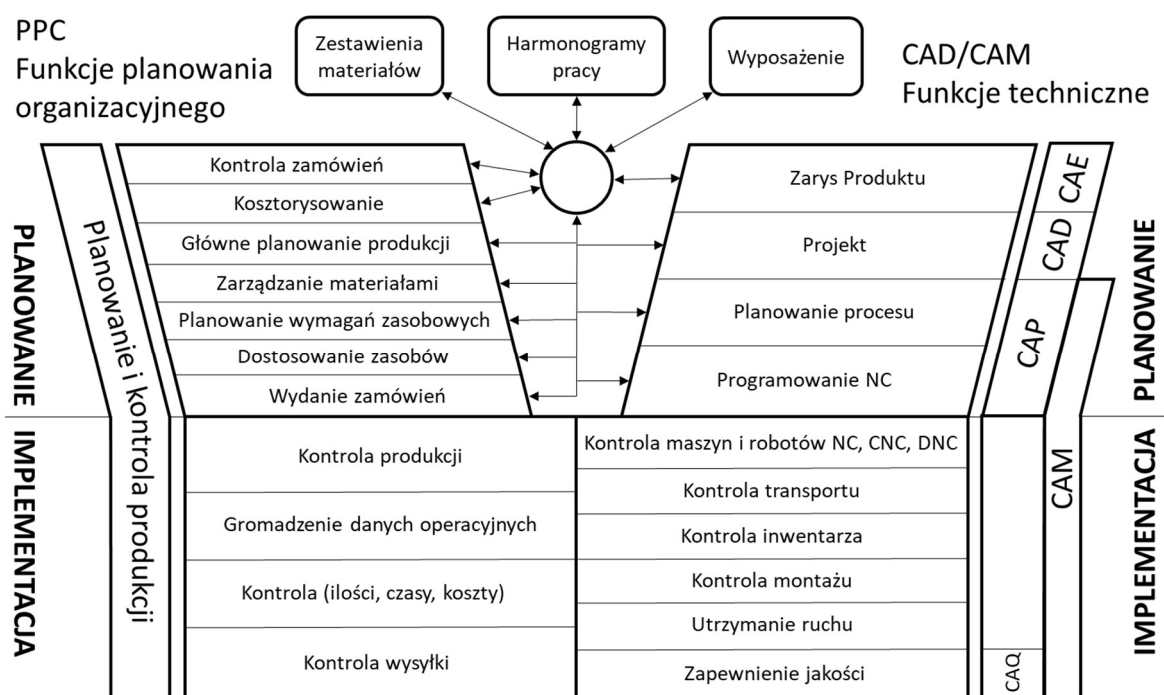
Co ciekawe, on sam wspomina w swojej rozprawie, że początkowa intencja Sketchpada nie była wcale ukierunkowana na jeden określony cel, na przykład zastąpienie konwencjonalnych technik rysunkowych, a bardziej na utworzenie systemu będącego w stanie zaspokoić wymagania i potrzeby jak najszerzego grona odbiorców [48]. Uniwersalność ta zapewniła Sketchpadowi tak wielką popularność i rozpoznawalność w środowisku naukowym, jak i przemysłowym. W 1988 roku I. Sutherland otrzymał nagrodę Turinga przyznaną corocznie od 1966 roku za wybitne osiągnięcia w dziedzinie informatyki przez ACM (ang. *Association for Computing Machinery*) „Za jego pionierski i wizjonerski wkład w grafikę komputerową, poczynając od Sketchpada i kontynuując później” [2], a w 2012 roku został uhonorowany nagrodą Kioto za „Pionierskie osiągnięcia w rozwoju grafiki komputerowej i interfejsów interaktywnych” [26].

### 2.3 Od CAD/CAM do CAx

W punkcie 2.1 Rozdziału 2 niniejszej pracy zostały opisane okoliczności połączenia systemów CAD i CAM, którego głównym bodźcem było dążenie człowieka do rozwoju technologicznego branży przemysłowej. Nie było to jednak ostatnie połączenie na drodze integracji komputerowego wspomaganie rozwoju wytworu. Wraz z dalszym postępowaniem technologicznym systemów komputerowego wspomaganie pojawiały się też ich nowe koncepcje i zastosowania czego efekty mogą być obserwowane do chwili obecnej. Oprócz opisywanych w niniejszej pracy systemów CAD, CAM i CAE, wartymi wspomnienia są następujące rozwiązania:

- PPC (ang. *Production Planning and Control*) – Planowanie i Sterowanie Produkcją,
- CAP (ang. *Computer Aided Planning*) – Komputerowo Wspomagane Planowanie,
- CAPP (ang. *Computer Aided Process Planning*) – Komputerowo Wspomagane Planowanie Procesów,
- CAQ (ang. *Computer Aided Quality Control*) – Komputerowo Wspomagane Sterowanie Jakością [7].

Wszystkie powyższe koncepcje A. W. Scheer sklasyfikował w swojej książce pod jedną grupą systemów komputerowego wspomaganie CAx (rys. 2) [43].



Rys. 2. Klasyfikacja systemów CAx – na podstawie [43]

Integracja tak wielu systemów z różnych dziedzin procesu wytwarzania wytworu w jedną spójną grupę systemów CAx nie byłaby jednak możliwa, gdyby nie prowadzone w czasach rozwoju CAD prace nad standardami wymiany danych, powszechnie nazywanymi też formatami neutralnymi, które mogły faktycznie połączyć ją we wzajemnie powiązaną strukturę. Z punktu widzenia użytkownika systemów CAD standardy te były i w dalszym ciągu są tak istotne, ponieważ, jak wspomniano w punkcie 2.2 Rozdziału 2 niniejszej pracy, dane 3D będące rezultatem procesu projektowo-konstrukcyjnego stanowiły podstawę dla dalszych prac związanych z wytwarzaniem, symulacjami inżynierskimi i innymi pracami związanymi z wytwarzaniem wytworów. Istniały oczywiście inne formaty neutralne, nie będące w bezpośredni sposób związane z tym procesem, jednak do tych najważniejszych i wywodzących się wprost z CAD zaliczyć należy:

- IGES (ang. *Initial Graphics Exchange Specification*) – format pozwalający na wymianę danych 2D i 3D oparty na standardzie kodowania znaków w komunikacji elektronicznej – ASCII (ang. *American Standard Code for Information Interchange*) [30], zainicjowany przez Siły Powietrzne Stanów Zjednoczonych USAF (ang. *United States Air Force*) i po raz pierwszy opublikowany w marcu 1980 roku przez amerykańskie Narodowe Biuro Standardów (ang. *National Bureau of Standards*) [34]; IGES rozwijany był aż do 1996 roku, kiedy to powstała jego ostatnia wersja 5.3,
- STEP (ang. *STandard for the Exchange of Product model data*) – jest to w gruncie rzeczy norma ISO 10303 opisująca standard wymiany danych po raz pierwszy opublikowana przez ISO (ang. *International Organization for Standardization*) w 1994 roku po około 10 latach badań i rozwoju, w których zaangażowane było kilkaset osób z całego świata; podobnie jak IGES, STEP wykorzystuje do konwersji standard kodowania znaków w komunikacji elektronicznej – ASCII, jednak jest on przeznaczony do obsługi znacznie szerszego zakresu danych związanych z produktem, obejmującego cały cykl życia produktu, a jego rozwój trwa do dziś [36].

Ktoś w tym miejscu mógłby zadać pytanie: *Jaki związek mają neutralne formaty z tematyką niniejszej pracy, czyli optymalizacją struktury asocjatywnych modeli CAD?* No cóż, odpowiedź na to pytanie nasuwa się jedna: w zasadzie żaden. Wynika to z faktu, że dane zapisane do takiej postaci nie posiadają owej struktury i nie są asocjatywne w znaczeniu tu rozpatrywanym. Nie ma więc przesłanek, by rozprawiać na temat optymalizacji ich struktury. By zrozumieć dlaczego autor skupia w tym miejscu uwagę czytelnika na standardach wymiany danych należałoby wpierw, przynajmniej skrótowo, wyjaśnić mechanizm tworzenia modeli 3D w natywnym dla nich środowisku.

Każdy model 3D utworzony w danym systemie CAD opisany jest za pomocą, niedostępnych z poziomu oprogramowania użytkownikowi, matematycznych równań i funkcji. Matematyczny opis tworzy zaś topologię modelu, która tworzy jego geometryczną postać. Konstruktor pracując nad geometryczną postacią elementu sporządza tym samym, w sposób świadomy lub nie, jego strukturę. Oczywiście pożądanym scenariuszem jest robienie tego w sposób świadomy i optymalny, biorąc pod uwagę przyjęte kryteria wyboru.

Wracając do formatów neutralnych, idea ich utworzenia pozwalająca na wymianę danych w obrębie jednej grupy systemów CAx niesie za sobą niezaprzeczone korzyści, bo to w dużym stopniu dzięki nim dziś takie systemy funkcjonują w obrębie jednego zintegrowanego środowiska. Standardy wymiany danych przyczyniły się do powstania nowoczesnej, spójnej koncepcji projektowania, rozwoju produktu i procesów jego wytwarzania, nazwanej Projektowaniem Współbieżnym CE (ang. *Concurrent Engineering*) [7]. Ponadto, integracja systemów

komputerowego wspomaganie CAX i implementacja w nich formatów neutralnych stały się, obok skomputeryzowanych technologii wytwarzania DNC i CNC, kolejnymi przesłankami wykrystalizowania się idei Komputerowo Zintegrowanego Wytwarzania CIM (ang. *Computer Aided Manufacturing*) [15]. Z drugiej jednak strony konwersja natywnego modelu 3D do jednego ze standardów wymiany danych wiąże się z utratą jego topologii, a więc utratą dużej części pracy włożonej przez konstruktora podczas jego tworzenia. Nie całej jednak, bo rezultat jego pracy – geometryczna postać elementu – jest zachowana. Należałoby zatem zadać dodatkowe pytanie: *Czy osoby decyzyjne w przedsiębiorstwie i zajmujące się zarządzaniem zespołami składającymi się ze specjalistów, patrząc na natywny model 3D i jego odpowiednik przekonwertowany do jednego z naturalnych formatów, będą widziały jakąś różnicę?*

Formaty neutralne w dalszym ciągu nie są doskonałe, a konwersja modeli natywnych nie zawsze jest w pełni pomyślna. Jeśli jednak przyjąć, że wspomniana konwersja nie spowodowała widocznych na pierwszy rzut oka błędów, to dla menedżera bez specjalistycznej wiedzy przekonwertowany model będzie nie do odróżnienia od jego natywnego odpowiednika. Wprawne oko konstruktora natomiast, poprzez zastosowanie odpowiednich narzędzi CAD, taką różnicę już może zauważyć. Wynika to z faktu, że owa konwersja, biorąc pod uwagę obecny stan wiedzy, nie jest nigdy stuprocentową kopią modelu natywnego – głównie w kwestii precyzji geometrycznej. Każdy rodzaj konwersji danych pociąga za sobą ryzyko przekłamań, nieścisłości, a nawet utraty danych. Ponadto każdy system CAD ma zdefiniowane własne tolerancje geometryczne. Na przykład dwa płyty powierzchni mogą mieć wspólną krawędź w jednym systemie, a w innym nie, bo tolerancje identyczności krzywych nie muszą być w obu systemach takie same [62]. Jeśli jednak z punktu widzenia menedżera rezultatem prac jego zespołu są modele 3D, a ich format wydaje się nie zmieniać ich końcowej geometrii, to jaki jest sens poświęcania cennego czasu projektowego na żmudne tworzenie ich topologii, nie wspominając już o jej optymalizacji? Czy dla niezaznajomionego z rozważaną tematyką menedżera istotnym będą szybko przygotowane dane 3D i większa szansa ukończenia projektu na czas, czy może wolno, ale w przemyślany sposób sporządzone struktury postaci geometrycznych i ryzyko przekroczenia założonego czasu projektowego? Odpowiedzi na te pytania wydają się być oczywiste. Jednak wieloletnia praktyka przemysłowa autora w charakterze specjalisty pozwala mu wyciągnąć wnioski i stwierdzić, że w kwestii przygotowania dokumentacji projektowo-konstrukcyjnej należy patrzeć szerzej i dalej niż tylko na jeden, aktualnie przygotowywany projekt – czego sednem jest niniejsza praca i co zostało przedstawione w jej Rozdziale 4.

Zatem na podstawie powyższych rozważań autor stwierdza, że wraz z wprowadzeniem do powszechnego użytku standardów wymiany danych i rozpoczęciem integracji systemów komputerowego wspomaganie projektowania wytworów do CAX, następnie do CIM, by osiągnąć ją w formie dzisiejszych systemów PLM – rozpoczął się proces zmniejszania ważności samych systemów CAD, a etap tworzenia danych 3D przestał zdobywać uwagę kadry kierowniczej. Przyczyną tego był nieustanny wyścig z czasem w realizacji, dających coraz większy zysk, bardziej złożonych projektów na drodze w rozwoju przedsiębiorstwa i w zdobyciu jego przewagi nad konkurencją. Cóż zatem należałoby zrobić? Odpowiedź na to pytanie padła już w niniejszej pracy, a były nią słowa Patricka Hanratty'ego:

*„...To co jest potrzebne to jądro systemowe CAD modelowania powierzchniowego/bryłowego, które będzie funkcjonowało w zasięgu wszystkich głównych systemów CAD i CAM oferując podwójną precyzję wejściową i wyjściową z całym przetwarzaniem w precyzji poczwórnej*



*i efektywnie nieograniczonym rozmiarem obiektu, np. łączenie dwóch powierzchni swobodnych, każdych o długości 100 metrów, z mikronową tolerancją [58]”.*

Zanim jednak owo jądro systemowe wspólne dla głównych systemów CAD będzie możliwe do wykonania, to – zdaniem autora – należałoby wrócić do podstaw jakimi w tym przypadku jest tworzenie modeli 3D – ich topologii i ich optymalizacji – by poznać obecne możliwości tych systemów w tej kwestii i na tej podstawie zbudować uniwersalny format, który, mimo że uniwersalny, a więc kompatybilny z szeroką gamą systemów CAD obecnych na rynku, będzie w pełni parametryczny i asocjatywny. Taki stan jest bliżej nieokreśloną przyszłością, do której, w opinii autora, warto dążyć.

Niemniej jednak, dzięki tak dużej różnorodności technik CAx dziś inżynier ma do dyspozycji wiele systemów wspomagających wszystkie fazy rozwoju wyrobu: począwszy od koncepcji, przez konstrukcję i technologię, normowania prac i zapotrzebowania materiałowego, planowania i generowania programów na urządzenia sterowane numerycznie, aż do sterowania procesami wytwarzania, eksploatacją, serwisem, a kończąc na zarządzaniu przedsiębiorstwem. Komputery wraz z odpowiednim oprogramowaniem są stosowane też w zarządzaniu magazynami, transportem i zarządzaniu jakością [7].

## 2.4 Podsumowanie

Według autora dążenie do jak największej integracji systemów CAx, między innymi poprzez wprowadzenie do nich standardów wymiany danych, stały się częściową przyczyną stopniowej utraty ważności systemów CAD w procesie projektowo-konstrukcyjnym powodując, że techniki tworzenia modeli 3D zeszyły na dalszy plan. Zamiast tego ważniejszym stał się stopień integracji i zarządzania dokumentacją pod nadzorem najbardziej rozbudowanych funkcjonalnie w tej kwestii systemów PLM. Oczywiście fakt istnienia tak kompleksowego oprogramowania ma swoje niezaprzeczalne zalety, a praca nad formatami neutralnymi mająca na celu ułatwić wspomniany nadzór, to niewątpliwie krok w dobrym kierunku. Jednak zdaniem autora należałoby w poruszonym temacie cofnąć się o ten jeden krok skupiając się na optymalizacji struktury asocjatywnych modeli 3D, by dzięki temu móc zrobić dwa wprzód, wykorzystując w pełni możliwości systemów CAD i ich integracji w zintegrowanym środowisku PLM.

Patrząc przez pryzmat przytoczonej historii systemów CAD nasuwa się kilka wniosków:

- 1) skoro rozwój komputerowego wspomagania projektowania podyktowany był potrzebą wsparcia innych, bardziej znaczących z punktu widzenia wytwarzania wytworów, technik i skoro techniki te rozwinęły się do stopnia nieosiągalnego bez tego wsparcia, to należałoby przededefiniować ich hierarchię ważności w taki sposób, aby uwzględnić w niej systemy CAD i nadać im status priorytetowy; analizując wydarzenia jakie miały miejsce w latach 1949 – 1980 można stwierdzić, że właśnie do uzyskania takiego statusu dążono,
- 2) zalety zintegrowanego środowiska PLM są niezaprzeczalne, bo pozwalają koordynować prace projektowe z poziomu jednego globalnego systemu; jednak waga systemów CAD w tym środowisku, w kontekście sposobu przygotowywania danych – modeli 3D – na bazie których wykonywane są dalsze etapy na drodze do uzyskania końcowego wytworu, wydaje się być spychana na dalszy plan,
- 3) standard wymiany danych zachowujący parametryczność i asocjatywność natywnych modeli 3D pozwoliłby w pełni wykorzystać potencjał systemów PLM; zanim jednak do tego dojdzie należy skupić się na technikach tworzenia wirtualnych modeli.



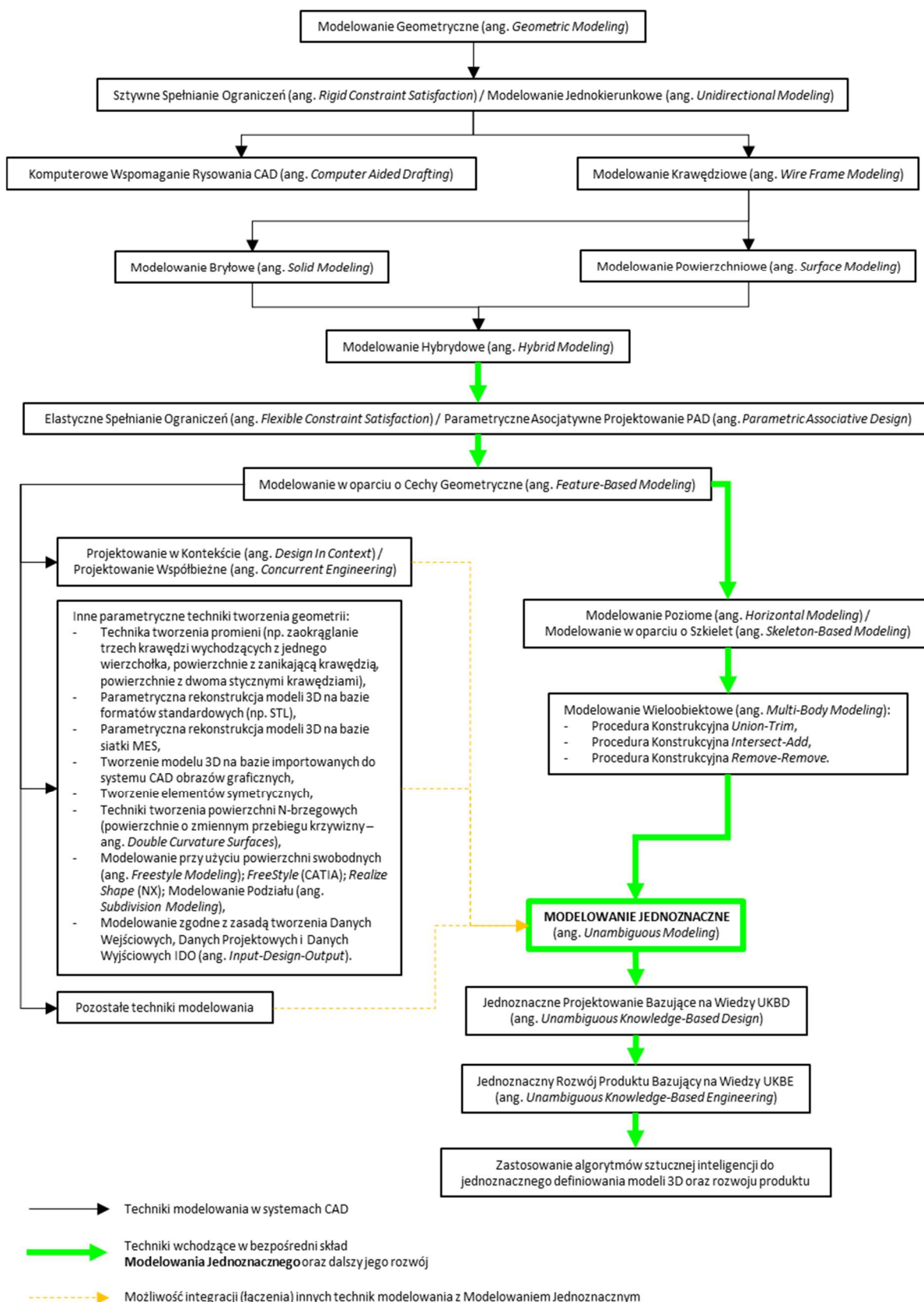
## 3 Techniki tworzenia modeli CAD w Modelowaniu Jednoznacznym

### 3.1 Od Modelowania Geometrycznego do Modelowania Jednoznacznego

Od początku istnienia systemów CAD sposoby tworzenia wirtualnych modeli nieustannie ewoluowały. Dążenie człowieka do uzyskania jak najwierniejszej geometrycznie reprezentacji wytworu sprawiło, że obecnie można rozróżnić kilka typów tych reprezentacji, a każdy z nich jest wynikiem różnych technik modelowania wchodzących w skład omawianego w tym rozdziale Modelowania Geometrycznego. O ile początkowa faza rozwoju systemów CAD wykryła rodzaje modeli 2D/3D znane i stosowane do dziś, tak w późniejszych jego fazach nastąpił raptowny wzrost technik związanych z ich tworzeniem i stan ten trwa nadal, czego przykładem jest również niniejsza praca. W celu omówienia części współcześnie stosowanych technik tworzenia modeli 3D autor opracował ich podział w postaci schematu blokowego (Schemat 1). Schemat ten został przedstawiony w formie uproszczonej, natomiast jest on również dostępny w oryginalnym wymiarze pod poniższym adresem internetowym:

[https://1drv.ms/b/s!AgllpLbcAJbug\\_Y\\_p9MwcdwvVwmXvg?e=TeE4aZ](https://1drv.ms/b/s!AgllpLbcAJbug_Y_p9MwcdwvVwmXvg?e=TeE4aZ)

W Rozdziale 1 niniejszej pracy autor nadmienił, że proponowana metodyka optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD jest wynikiem wykorzystania kilku znanych w sferze inżynierskiej technik, a wybór tych technik jest podyktowany jego doświadczeniem konstruktorskim i przekonaniem o ich skuteczności. W Rozdziale 3 autor wprowadza – wspomnianą już – nazwę dla tej metodyki: **Modelowanie Jednoznaczne** (ang. *Unambiguous Modeling*), by przedstawić ją w dalszej części pracy w bardziej skondensowanej słownie formie i by móc użyć tej formy w utworzonym podziale technik tworzenia modeli CAD. Jednocześnie autor poprzez ten podział wskazuje, które techniki są dla Modelowania Jednoznacznego zalecane, a które z nich są opcjonalne, to znaczy, że w dalszym ciągu występuje możliwość ich integracji. Natomiast samo zagadnienie „jednoznaczności” pojawiało się na wielu etapach rozwoju systemów CAD, lecz do tej pory nie było ono formułowane w kontekście konkretnej metodyki.



Schemat 1. Podział technik tworzenia modeli CAD

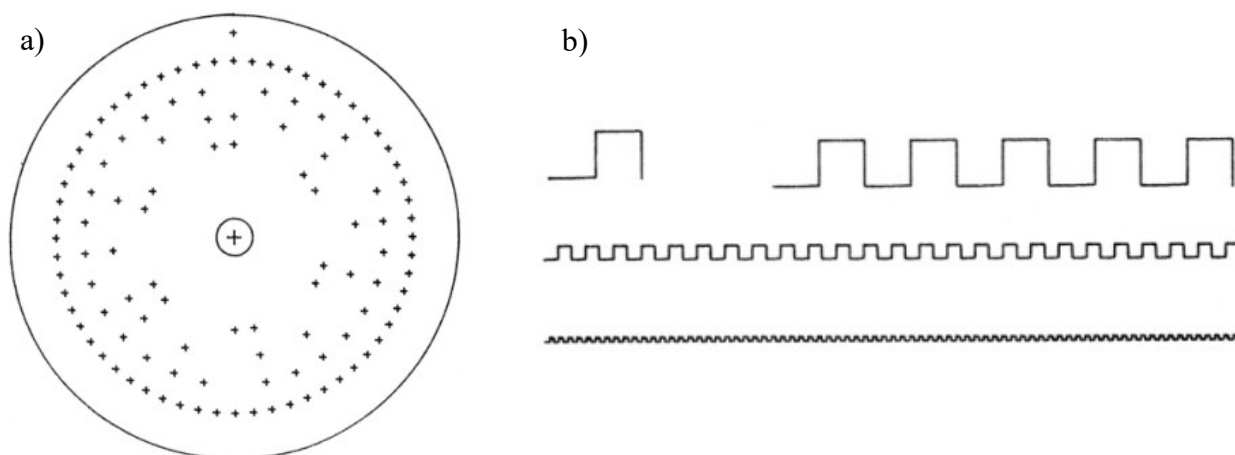
Należy jednak zwrócić uwagę, że zagadnienie to zawsze było związane z chęcią uzyskania, wspomnianej już, jak najwierniejszej geometrycznej reprezentacji wytworu. Zaproponowany podział technik tworzenia modeli CAD uwzględnia również dalszy rozwój Modelowania Jednoznacznego, w którym, zdaniem autora, należy skupić się na jego integracji z Projektowaniem

Bazującym na Wiedzy KBD (ang. *Knowledge-Based Design*) [9], jak i Rozwojem Produktu Bazującym na Wiedzy KBE (ang. *Knowledge-Based Engineering*) [60, 61], by w ostatniej fazie tej integracji wykorzystać najnowsze technologie bazujące na Sztucznej Inteligencji SI (ang. *Artificial Intelligence – AI*) [17]. W konsekwencji optymalizacja asocjatywnych modeli 3D będzie odbywać się automatycznie, natomiast zadaniem konstruktora będzie, w zależności od potrzeb, odpowiednie definiowanie danych wejściowych dla nich w systemie CAD wykorzystującym algorytmy sztucznej inteligencji. Jednak zanim do tego dojdzie autor chce skupić uwagę czytelnika na obecnie dostępnych środkach i metodach modelowania. Z uwagi na mnogość występujących technik tworzenia modeli CAD autor skoncentrował się na technikach, w wyniku których wykrystalizowały się rodzaje tych modeli oraz technikach wchodzących w bezpośredni skład Modelowania Jednoznacznego. Podczas tych rozważań ponownie odniósł się on do historii związanej z systemami komputerowego wspomaganie projektowania, aby lepiej zobrazować powstałą potrzebę ich ewolucji.

## 3.2 Geneza Modeli CAD

### 3.2.1 Komputerowe Wspomaganie Rysowania (ang. *Computer Aided Drafting*)

Początkowo rozwinięcie skrótu CAD oznaczało przynależność pierwszych systemów inżynierskich do komputerowego tworzenia dwuwymiarowej dokumentacji technicznej, czyli do Komputerowego Wspomaganie Rysowania (ang. *Computer Aided Drafting*). Dopiero po rozszerzeniu technik projektowania o funkcjonalność tworzenia geometrii przestrzennej rozwinięcie powyższego skrótu na dobre zostało przekształcone na Komputerowe Wspomaganie Projektowania (ang. *Computer Aided Design*). Zatem Komputerowe Wspomaganie Rysowania, zwane dalej Modelowaniem Dwuwymiarowym, było oparte na tworzeniu **Modeli 2D** składających się z płaskich prymitywów geometrycznych, takich jak: punkty, linie, łuki, krzywe stożkowe, symbole, tekst, które z kolei były opisywane graficznymi atrybutami np. grubość linii, rodzaj linii itd. (rys. 3).



Rys. 3. Modele 2D wykonane w systemie Sketchpad: a) enkoder BCD zegarka cyfrowego, b) linia opóźniająca obwodu drukowanego [48]

Już na tym etapie rozwoju systemów CAD powstawały pierwsze techniki konstrukcyjne polegające między innymi na:

- definiowaniu punktów w oparciu o koordynaty odnoszące się do kartezjańskiego układu współrzędnych,
- definiowaniu punktów na podstawie przecinających się linii,

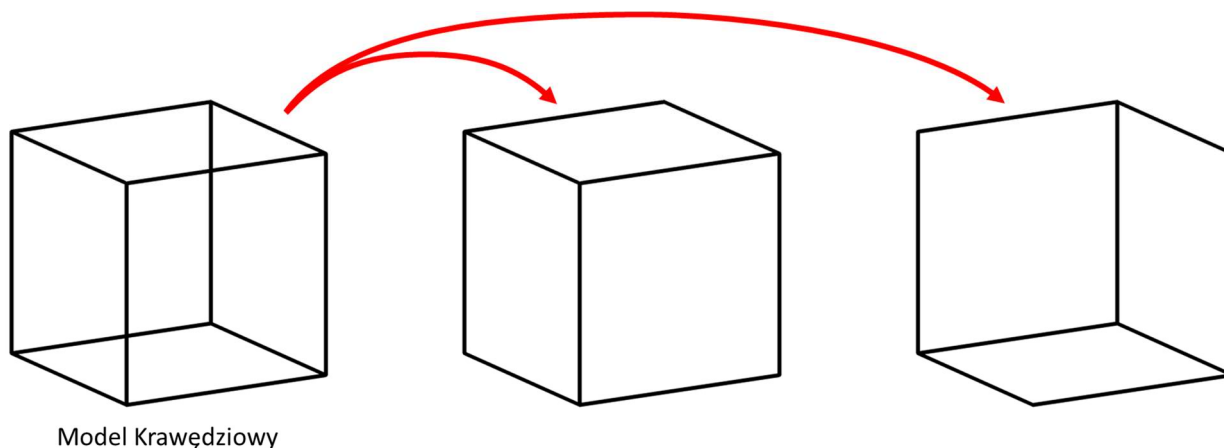
- definiowaniu linii przebiegającej między dwoma wcześniej zdefiniowanymi punktami,
- definiowaniu linii przebiegającej przez dany punkt we wskazanym kierunku na określoną odległość,
- definiowanie płaskich prymitywów geometrycznych w oparciu o więzy postaciowe np. równoległość, prostokąt, jak i więzy wymiarowe np. odległość między dwoma elementami, długość elementu, kąt,
- definiowanie płaskich prymitywów geometrycznych w oparciu o pomocnicze elementy konstrukcyjne nie wchodzące w skład właściwej geometrii projektowanego wytworu.

Ponadto systemy Komputerowego Wspomagania Rysowania umożliwiały tworzenie geometrii na wcześniej zdefiniowanych warstwach pozwalających wyświetlić określoną zawartość rysunku. Niektóre z tych systemów oferowały możliwość tworzenia powiązań definiowanej geometrii, czyli definiowania asocjatywnych płaskich prymitywów geometrycznych. Należy tutaj dodać, że jedną z głównych przyczyn, która sprawiła, że systemy komputerowego wspomagania projektowania mogły zaistnieć w sferze inżynierskiej, była możliwość formułowania określonych parametrów tworzonej geometrii. Oznaczało to nadawanie pewnych ograniczeń geometrycznych nazwanych **więzami geometrycznymi**, które są stosowane również do dziś. Więzy geometryczne pozwalają na określenie wzajemnego położenia elementów profilu (więzy postaciowe) oraz określają wartości poszczególnych cech geometrycznych (więzy wymiarowe) [45]. W połączeniu ze wspomnianymi powiązaniem poszczególnych elementów geometrii, czyli **asocjatywnością** [49], uzyskiwano **Jednokierunkowy Parametryczny Model Graficzny** (ang. *Unidirectional Parametric Graphical Model*). Oznacza to, że wraz z początkiem systemów CAD swój początek miała również ich podstawowa funkcjonalność – **parametryczność** [49]. Jej użyteczność była jednak mocno ograniczona. Głównym tego powodem był sposób w jaki system CAD dokonywał obliczeń utworzonych, a potem zmienianych, parametrów. Obliczenia te dokonywane były według oryginalnej sekwencji tworzenia operacji modelowania – jednokierunkowo, w związku z tym parametry nie mogły być od tej sekwencji uniezależnione. Takie „sztywne” przypisywanie ograniczeń geometrycznych do danej procedury konstrukcyjnej nazwano **Sztywnym Spełnianiem Ograniczeń** (ang. *Rigid Constraint Satisfaction*) natomiast utworzony w ten sposób model nazwano **Modelem Jednokierunkowym** lub **Proceduralnym**. W konsekwencji użytkownik pracujący w systemie wspierającym Modelowanie Jednokierunkowe często nie miał możliwości wykorzystania utworzonych w ten sposób modeli w podobnych projektach, bo system nie umożliwiał wprowadzania nowych ani usuwania istniejących już ograniczeń geometrycznych.

Dwuwymiarowa dokumentacja techniczna tworzona w systemach komputerowego wspomagania rysowania skracala czas jej przygotowania i zapewniała dużą dokładność geometryczną w stosunku do dokumentacji sporządzanej technikami konwencjonalnymi. Niestety mimo komputerowego wsparcia modele 2D nie wyeliminowały jednej ważnej wady manualnie przygotowywanych rysunków – dwuznaczności prezentowanych w ten sposób poszczególnych jego elementów. Oczywiście czytelnik słusznie mógłby zauważyć, że dobrze opisana dokumentacja techniczna owej dwuznaczności powinna być pozbawiona. Jednak tak jak wspomniano w punkcie 2.1 Rozdziału 2 niniejszej pracy – teoria nie zawsze pokrywała się z praktyką zawodową, dlatego też wraz z wprowadzeniem **Modeli 3D** do komputerowego wspomagania prac inżynierskich CAE zrodziła się idea przeniesienia ich również do komputerowego wspomagania projektowania CAD.

### 3.2.2 Modelowanie Krawędziowe (ang. *Wire Frame Modeling*)

W punkcie 2.2 Rozdziału 2 niniejszej pracy wspomniano, że już w 1964 roku T. Johnsonowi udało się dodać do pierwszego systemu wspomagającego prace inżynierskie funkcjonalność tworzenia modeli 3D. Funkcjonalność ta bazowała na tych samych rozwiązaniach matematycznych, na których Sutherland zbudował system Sketchpad, dlatego jej wizualna reprezentacja w postaci modeli 3D przypominała efekt dzieła Sutherlanda. Innymi słowy Modelowanie Krawędziowe opierało się na podobnych założeniach jak Modelowanie Dwuwymiarowe i stanowiło jednocześnie wstęp do Modelowania Trójwymiarowego. **Modele Krawędziowe** ponownie składały się z graficznych prymitywów geometrycznych, jak: linie, krzywe, łuki itd., jednak tym razem prymitywy te były przestrzenne, a nie płaskie. Oznaczało to, że każdy ich punkt opisywany był trzema współzrędnymi odniesionymi do kartezjańskiego układu współrzędnych X, Y, Z. Podobnie jak w modelach 2D, parametryzacja geometrii krawędziowej odbywała się według Sztywnego Spełniania Ograniczeń, a więc jej użyteczność również była niepełna. Był to jeden z powodów, dla których Modelowanie Krawędziowe było głównie wsparciem przy tworzeniu dwuwymiarowej dokumentacji technicznej i nie znalazło powszechnego zastosowania w innych aspektach projektowania inżynierskiego. Drugim równie ważnym powodem, przez który Modelowanie Krawędziowe nie zyskało zbyt dużej popularności, była podobnie jak w Modelowaniu Dwuwymiarowym – dwuznaczność reprezentacji graficznej. O ile możliwość tworzenia przestrzennych struktur stanowił duży krok w kierunku Modelowania Trójwymiarowego, tak reprezentacja graficzna tych struktur, na przykład w postaci rzutu składającego się z samych linii i krzywych, niejednokrotnie mogła być interpretowana przez konstruktora na kilka sposobów. Rysunek 4 przedstawia Model Krawędziowy sześcianu, którego rzut może przedstawiać jednocześnie dwie jego perspektywy.



Rys. 4. Dwuznaczność w Modelowaniu Krawędziowym

Zatem ponownie zaszła potrzeba dalszego rozwoju technik tworzenia modeli 3D na drodze do uzyskania jak najwierniejszej wirtualnej postaci projektowanego wytworu. Odpowiedź na tę potrzebę została przedstawiona przez sferę inżynierską przemysłu samochodowego, lotniczego i stoczniowego, dla której proste geometrie składające się z podstawowych prymitywów nie były wystarczające.

### 3.2.3 Modelowanie Powierzchniowe (ang. *Surface Modeling*)

Inżynierowie reprezentujący branże, w których skomplikowana geometria produkowanych wytworów była priorytetem stanęli przed wyzwaniem utworzenia systemu komputerowego

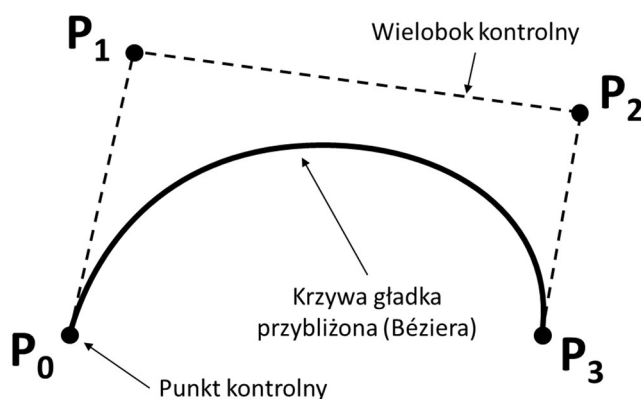
wspomagania, który umożliwiłby jej generowanie na ekranie komputera. Taka wirtualna reprezentacja musiała składać się nie tylko z prymitywów geometrycznych w postaci krzywych kanonicznych, ale również z powierzchni ograniczonych tymi prymitywami, które definiowały jednoznaczny kształt projektowanego komponentu. Jednak krzywe kanoniczne nie zapewniały powierzchniom wymaganej złożoności geometrycznej. W związku z tym narodziła się nowa koncepcja modelowania 3D – Modelowania Powierzchniowego.

### Krzywe Parametrycznie Swobodne

W pierwszej kolejności należało więc zastąpić owe prymitywy tak zwanymi Krzywymi Parametrycznie Swobodnymi, czyli takimi, które przechodziły przez określony zbiór punktów w przestrzeni i były gładkie, to znaczy których krzywizna nie zmieniała się w sposób niepotrzebnie skomplikowany [62]. Dodatkowo, model matematyczny Krzywej Parametrycznie Swobodnej musiał spełniać następujące wymagania podstawowe:

- 1) Definicja dowolnego kształtu (także kanonicznego) z zadaną dokładnością.
- 2) Łatwość wyznaczenia współrzędnych i pochodnych dla dowolnego punktu krzywej.
- 3) Model geometryczny krzywej powinien być łatwo i intuicyjnie modyfikowalny [62].

W latach 50-tych ubiegłego stulecia francuski matematyk i inżynier Pierre Bézier [21] związany z przemysłem samochodowym zaproponował definicję krzywej gładkiej przybliżonej opartej o tak zwany wielobok kontrolny składający się z kolei ze zbioru punktów kontrolnych (rys. 5).

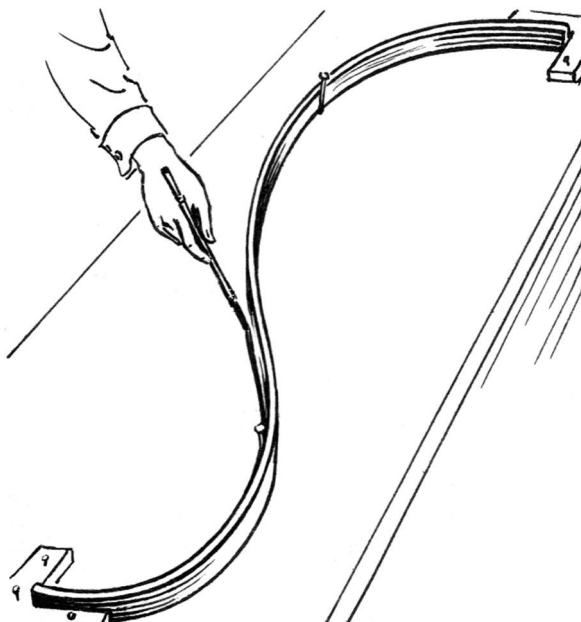


Rys. 5. Krzywa Béziera [25]

Jej model matematyczny realizowany był przez funkcje wielomianowe Bernsteina [21], dzięki którym stało się możliwe spełnienie powyższych wymagań podstawowych dla Krzywej Parametrycznie Swobodnej. Cechą charakterystyczną przybliżonych krzywych Béziera było to, że przechodziły one tylko przez początkowy i końcowy punkt swojego wieloboku kontrolnego, wyznaczając tym samym ich wektory styczne. Natomiast modyfikacje położenia każdego z punktów kontrolnych wpływały na kształt całej krzywej, rozkład zmian krzywizny oraz umożliwiały ustalenie ciągłości krzywej w jej punktach skrajnych [62]. Należy zaznaczyć, że Bézier nie był jedynym, który pracował nad krzywymi przybliżonymi, a do podobnych wniosków w swoich badaniach doszedł na przykład Paul de Casteljau. Nazwa krzywych przybliżonych pochodząca od nazwiska francuskiego inżyniera wyniknęła z faktu, że Bézier jako jedyny bez ograniczeń publikował swoje prace już na przełomie lat 50 i 60 ubiegłego stulecia [62]. Niestety krzywe Béziera nie były pozbawione wad, a najważniejszą z nich była utrudniona kontrola ich kształtu realizowana w sposób globalny, a nie lokalny. Częściowym rozwiązaniem była

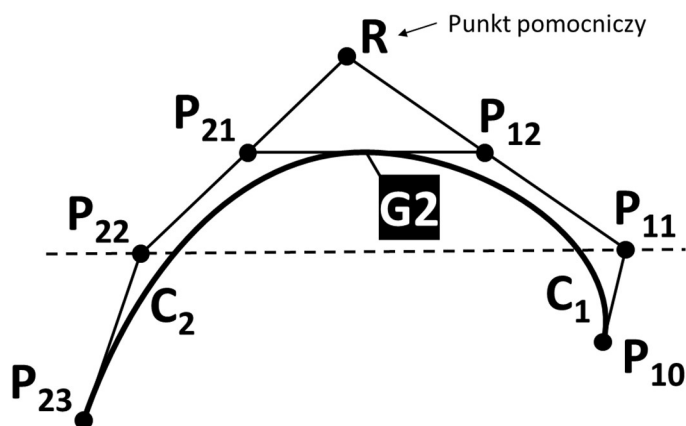


możliwość łączenia elementarnych krzywych Béziera w jedną krzywą sklejaną. Rezultat był bardzo podobny do krzywych swobodnych rysowanych techniką konwencjonalną. W technice tej podstawowym elementem kreślarskim była cienka drewniana listwa (ang. *Spline*), której kształt można było swobodnie formować poprzez odpowiednie ustawienia napinaczy śrubowych (rys. 6) [62].



Rys. 6. Konwencjonalny przyrząd kreślarski – *Spline* [47]

W związku z powyższym krzywym sklejanym nadano nazwę pochodzącą od owej drewnianej listwy kreślarskiej – *Spline* (rys. 7).



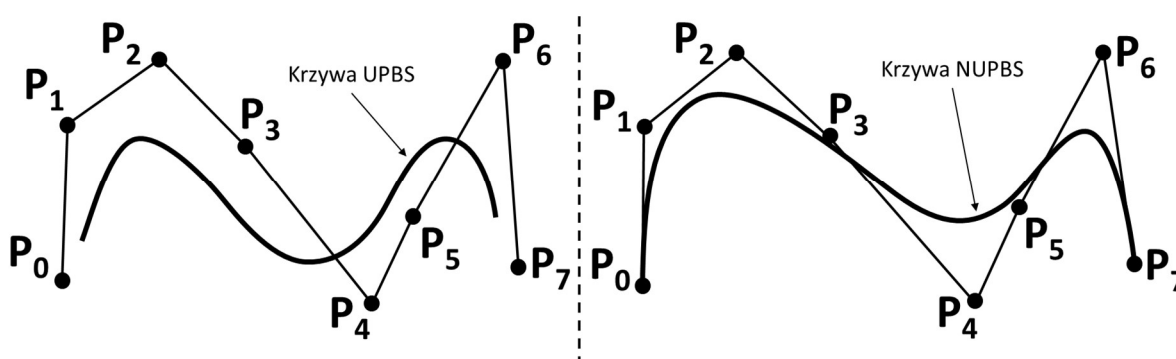
Rys. 7. Krzywa sklejana *Spline* – połączenie dwóch krzywych Béziera  $C_1$  i  $C_2$  z zachowaniem ciągłości krzywizny (G2) [62]

Krzywe typu *Spline* zapewniały tylko niewielki wzrost stopnia modyfikowalności lokalnej, nie zmniejszając przy tym zapotrzebowania na moc obliczeniową komputera podczas ich obliczania. Były to bowiem w dalszym ciągu krzywe Béziera połączone w jedną całość.

W roku 1946 Isaac Jacob Schoenberg zaproponował podział jednej krzywej na mniejsze „fragmenty” oraz opartą na wielomianach metodę zapewniającą zachowanie ciągłości pomiędzy nimi i nazwał takie krzywe *B-Spline* [62]. Z uwagi na brak efektywnego algorytmu obliczeniowego oraz brak zapotrzebowania na jego praktyczne wykorzystanie propozycja

Schoenberga została pominięta w późniejszym rozwoju technik tworzenia modeli 3D, aż do początku lat 70-tych ubiegłego wieku, kiedy to Maurice Cox i Carl de Boor, pracując niezależnie od siebie nad interpretacją geometryczną prac Schoenberga, zaproponowali prostą i stabilną formułę rekurencyjną, która umożliwia obliczenia konieczne do wizualizacji krzywej *B-Spline* [62]. Największą zmianą w stosunku do krzywych sklejanego typu *Spline* była możliwość ich lokalnej modyfikacji, a opracowana interpretacja geometryczna pozwalała definiować w systemach CAD ich dwa rodzaje (rys. 8):

- 1) Jednorodna Wielomianowa Krzywa *B-Spline* UPBS (ang. *Uniform Polynomial B-Spline*) – nie przechodziła przez początkowy i końcowy punkt jej wieloboku kontrolnego,
- 2) Niejednorodna Wielomianowa Krzywa *B-Spline* NUPBS (ang. *Non-Uniform Polynomial B-Spline*) – przechodziła przez początkowy i końcowy punkt jej wieloboku kontrolnego (podobnie jak w krzywych Béziera).



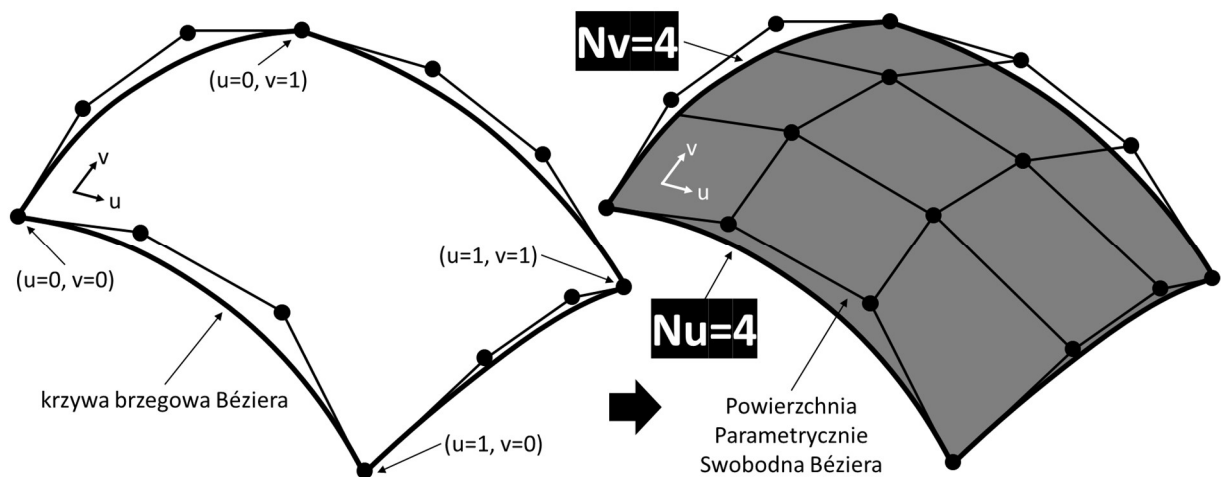
Rys. 8. Porównanie krzywych UPBS i NUPBS [62]

W praktyce konstrukcyjnej największe zastosowanie znalazły krzywe NUPBS, ponieważ dla konstruktora istotne było definiowanie skrajnych jej punktów kontrolnych, a tym samym jej początku i końca. Rozwinięciem powyższych badań była opublikowana w 1975 roku praca doktorska Kena Versprilla, w której zaproponował on jeszcze jeden typ krzywej łączącej w sobie cechy krzywych niejednorodnych (NUPBS) oraz wymiennych. Zatem Niejednorodna Wymienna Krzywa *B-Spline* NURBS (ang. *Non-Uniform Rational B-Spline*) Versprilla zachowywała zdolność do lokalnej jej modyfikacji, przechodziła przez początkowy i końcowy punkt jej wieloboku kontrolnego, a dodatkowo umożliwiała tworzenie dokładnych modeli krzywych stożkowych (elipsy, hiperbole, okręgi), czego nie umożliwiały jej poprzedniczki. Dzięki połączeniu powyższych cech implementacja krzywych NURBS zapewniała największą swobodę konstrukcyjną, jednak jej algorytmy obliczeniowe były bardziej skomplikowane niż algorytmy krzywych Béziera i *B-Spline*.

### Powierzchnie Parametrycznie Swobodne

Rozwój kolejnych typów Krzywych Parametrycznie Swobodnych był dla Modelowania Powierzchniowego o tyle istotny, że to na ich podstawie definiowane były Powierzchnie Parametrycznie Swobodne. Oznacza to, że reguły związane z wcześniej opisanymi krzywymi mogły być uogólnione również do powierzchni. Model matematyczny powierzchni był po prostu rozszerzeniem modelu matematycznego krzywej. Przestrzeń parametryczna takiego modelu była rozszerzona z jednowymiarowej ( $u$ ) w przypadku krzywych do dwuwymiarowej ( $u, v$ )

w przypadku powierzchni. Definicja Powierzchni Parametrycznie Swobodnej była oparta na definicji czterech krzywych brzegowych, które definiowały jej granice (rys. 9).



Rys. 9. Przykładowa Powierzchnia Parametrycznie Swobodna Béziera wygenerowana w oparciu o cztery krzywe brzegowe Béziera [62]

Można powiedzieć, że krzywa  $u=0$  była „przeciągana” wzdłuż krzywych  $v=0$  i  $v=1$  (prowadnic) w taki sposób, że jej punkty końcowe „ślizgały” się po tych krzywych. Wraz ze zmianą wartości parametru  $v$  zmieniał się także kształt przeciąganej krzywej w taki sposób, aby w punktach końcowych prowadnic uzyskać kształt zdefiniowany przez krzywą  $u=1$ . Dla każdej wartości parametrów  $u$  i  $v$  system CAD generował krzywą izoparametryczną [62], która mogła być traktowana jako krzywa równoległa do krzywej granicznej, ale ta równoległość była opisana stałą za pomocą wartości parametru ( $u$  lub  $v$ ), a nie odległości mierzonej w milimetrach. Zbiór krzywych izoparametrycznych w obu kierunkach głównych definiował Powierzchnię Parametrycznie Swobodną [62]. Zatem tak jak w przypadku krzywych, powierzchnie oparte były na sieci punktów kontrolnych zachowując przy tym gładkość, a ich model matematyczny realizowany był przez funkcje wielomianowe Bernsteina. Natomiast ich typ uzależniony był od typu zastosowanych do jej tworzenia krzywych. Przykładowo, powierzchnia Béziera oparta była o cztery krzywe brzegowe Béziera, a więc przechodziła ona tylko przez narożniki jej wieloboku kontrolnego. Analogicznie, jeśli któraś z krzywych brzegowych była krzywą typu *B-Spline* (UPBS, NUPBS, NURBS), to powierzchnia wynikowa również była tego typu (UPBS, NUPBS lub NURBS). Modyfikacje dowolnego punktu kontrolnego sieci powodowały, podobnie jak w przypadku krzywych, stosowne zmiany kształtu powierzchni: globalne w przypadku powierzchni Béziera i lokalne w przypadku powierzchni zbudowanych na podstawie krzywych sklepanych [62].

Która z opisanych krzywych i powierzchni jest najlepsza? Z punktu widzenia autora dla wygody konstruktora najlepsze wydają się krzywe i powierzchnie Béziera z racji ich najmniejszej geometrycznej złożoności, a więc potencjalnie najmniejszych problemów przy ich tworzeniu i późniejszym modyfikowaniu. Nie można jednak ograniczać możliwości projektowo-konstrukcyjnych tylko dla wygody samego użytkownika systemu CAD. Rozwój krzywych i powierzchni miał przecież na celu uzyskanie większej swobody i kontroli nad modyfikowaną geometrią. Zatem zamiast ograniczać się do korzystania z określonych krzywych czy powierzchni należy, zdaniem autora, skupić się na ich prawidłowym definiowaniu wykorzystując przemyślaną

technikę modelowania. Inną sprawą jest fakt, że współczesne systemy CAD wykorzystują najbardziej rozwiniętą ich formę, czyli NURBS.

Ale czy generowane w ten sposób modele 3D zapewniały wspomnianą wcześniej jednoznaczność kształtu projektowanego komponentu? Z jednej strony tak, bo tworzone powierzchnie w sposób jednoznaczny ograniczały przestrzeń uzyskując w ten sposób pożądaną postać geometryczną. Z drugiej strony w Modelowaniu Powierzchniowym brakowało jednego czynnika, by uważać je jako technikę pozwalającą uzyskać stuprocentową wierność postaciową wytworu. Tym czynnikiem był brak wnętrza modelu, a co za tym idzie, cech tworzywowych (masa, gęstość, momenty bezwładności itp.) [69]. Brak ten miała wyeliminować kolejna technika tworzenia modeli 3D bazująca na bryłach.

#### 3.2.4 Modelowanie Bryłowe (ang. *Solid Modeling*)

W kontekście wsparcia projektowania inżynierskiego Modelowanie Bryłowe było techniką stawianą ponad omówione wcześniej techniki tworzenia modeli 3D. Dzięki dodaniu trzeciego wymiaru modele bryłowe były dla konstruktora czytelniejsze niż dwuwymiarowa dokumentacja techniczna, ich reprezentacja graficzna pozbawiona była dwuznaczności modeli krawędziowych, w skład których wchodziły tylko punkty, linie i krzywe, a dodatkowo modele bryłowe nie były, tak jak modele powierzchniowe, puste w środku, a więc umożliwiały konstruktorowi nadawanie im cech tworzywowych. Ta jednoznaczność geometryczna obiektów bryłowych pozwalała myśleć o Modelowaniu Bryłowym jak o technice zapewniającej tworzenie kompletnych reprezentacji projektowanego wytworu. A przynajmniej tak było do czasu pojawienia się kolejnej techniki modelowania opartej o cechy geometryczne. Zanim jednak to nastąpiło modele bryłowe przeszły pewną ewolucję.

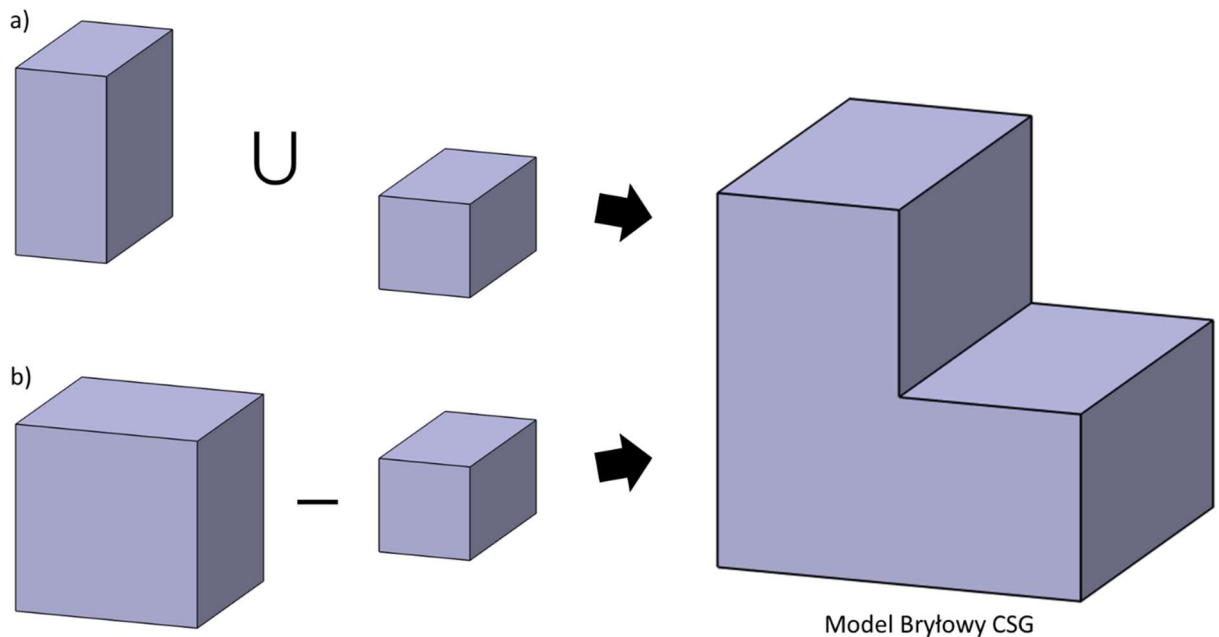
Jako pierwsze pojawiły się tak zwane **Modele Rozkładu** (ang. *Decomposition Models*). Bazowały one na ograniczonym dla danego systemu CAD zestawie przestrzennych prymitywów geometrycznych typu bloki, cylindry, kule itd. Konstruktor tworzył model łącząc wybrane prymitywy w prostych operacjach „sklejania”. Nie była to bowiem jeszcze funkcjonalność oparta o algebrę Boole’a, dlatego też nie było możliwości np. łączenia prymitywów nakładających się na siebie. Brak możliwości definiowania prymitywów użytkownika, niezależnie od dostępnego zestawu gotowych geometrii, spowodował konieczność dalszego ich rozwoju.

W konsekwencji tego rozwoju powstało kilka typów Modeli Strukturalnych (ang. *Constructive Models*), które zwłaszcza w postaci **Strukturalnych Geometrii Bryłowych CSG** (ang. *Constructive Solid Geometry*) poszerzyły zakres możliwości Modelowania Bryłowego. Tworzenie modeli typu CSG odbywało się już przy użyciu algebry Boole’a, co w sposób znaczący wpłynęło na technikę łączenia poszczególnych przestrzennych prymitywów geometrycznych i tym samym umożliwiło tworzenie prymitywów użytkownika – niedostępnych z poziomu oferowanego zestawu. Systemy CAD zapewniały w tym zakresie funkcjonalność analogiczną do działań na zbiorach, zatem realizowały takie operacje logiczne jak:

- suma ( $\cup$ ) – pozwalała łączyć ze sobą prymitywy nawet jeśli nakładały się na siebie,
- iloczyn ( $\cap$ ) – pozwalała uzyskać część wspólną nakładających się na siebie prymitywów,
- różnica ( $-$ ) – pozwalała odejmować nakładające się na siebie prymitywy.

Dzięki powyższym operacjom logicznym użytkownicy nie byli już ograniczeni do realizacji swoich intencji konstrukcyjnych w jeden możliwy sposób. Okazało się bowiem, że końcowa geometria mogła być realizowana przez różne kombinacje dodawania, odejmowania czy tworzenia części wspólnej poszczególnych brył składowych. Przykładowo, model bryłowy

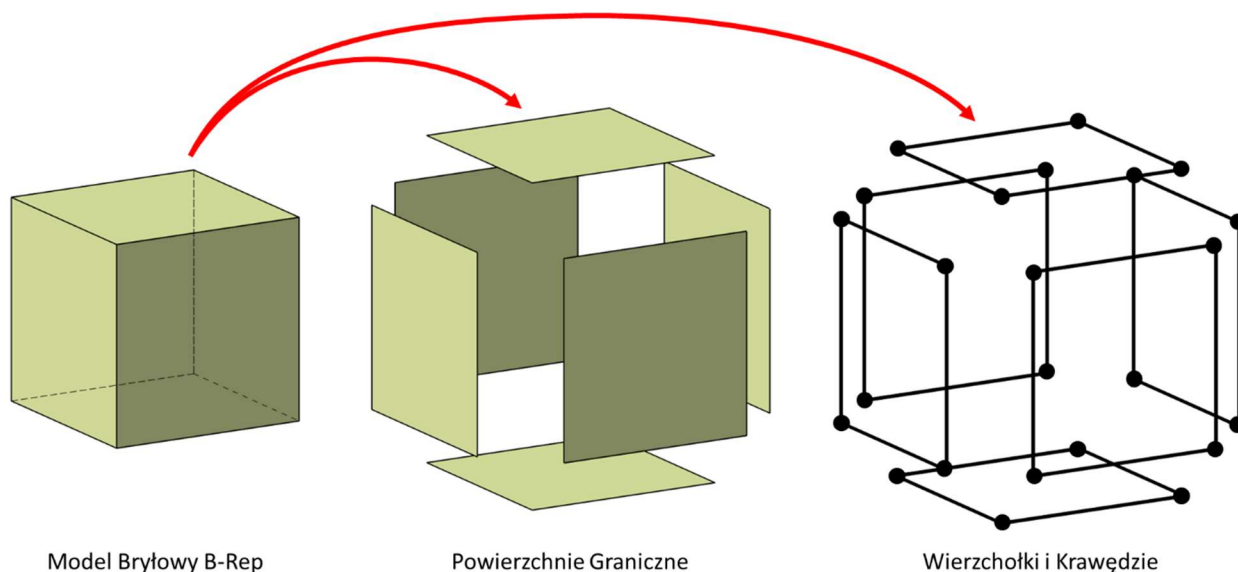
przedstawiony na rysunku 10 można było wykonać przynajmniej na dwa sposoby wykorzystując w pierwszym przypadku operację dodawania, a w drugim operację odejmowania.



Rys. 10. Dwa sposoby wykonania modelu bryłowego CSG: a) przy użyciu operacji logicznej dodawania, b) przy użyciu operacji logicznej odejmowania

Dla konstruktorów rozpoczęła się zatem era dowolności konstrukcyjnej realizowanej przez coraz bardziej zaawansowane systemy CAD. A czy w związku z tym można dopatrywać się na tym etapie zatracenia pewnej jednoznaczności wynikającej z wcześniejszych rozwiązań zakładających jedno możliwe dojście do projektowego celu? Według autora nie, bo mnogość możliwości oferowanych przez systemy CAD pozwoliły na uzyskiwanie coraz bardziej skomplikowanych postaciowo wytworów, a to z kolei pozwoliło na rozwój technologiczny wszędzie tam, gdzie były one wykorzystywane. Mnogość ta rozpoczęła również proces, w którym konstruktor mógł decydować w jaki sposób dojść do zamierzonego celu, toteż mógł on dokonywać optymalizacji tego procesu w oparciu o przyjęte kryteria wyboru. Konstruktor wspomagający się komputerowym projektowaniem zaczął odgrywać w procesie projektowo-konstrukcyjnym coraz większą rolę, a co za tym idzie – jego odpowiedzialność za realizowane konstrukcje – musiała być również większa. Niemniej jednak, tak jak wspomniano w Rozdziale 1 niniejszej pracy, zwiększona rola kadry inżynierskiej w procesie projektowo-konstrukcyjnym niekoniecznie oznaczała świadomość tego faktu kadry kierowniczej. To czego pozbyto się wraz z wprowadzeniem dowolności konstrukcyjnej, to unikalność procedur prowadzących do danego rozwiązania – od tej pory mogło być ich więcej niż tylko ta „jedyna słusza”. Jednakowoż brak tej unikalności procedur konstrukcyjnych wcale nie oznaczał cofania się w rozwoju technik tworzenia modeli 3D. Dodatkowymi atutami modeli CSG była ich hierarchiczna struktura w postaci drzewa kolejno wykonywanych operacji logicznych oraz stosunkowo zwięzła forma oznaczająca małe zapotrzebowanie na moc obliczeniową i pamięć komputera. Natomiast mimo otworzenia się sfery inżynierskiej na pewnego rodzaju swobodę w projektowaniu modeli CSG, to swoboda ta nadal zawężona była do wykorzystywania tylko przestrzennych prymitywów. Zatem w dalszym ciągu zastosowanie modeli CSG było ograniczone w przypadku potrzeby tworzenia złożonych geometrycznie struktur.

A skoro tak, należało więc opracować jeszcze jeden typ modeli 3D, który swą wielorodnością postaciową przypominał wcześniej opisane modele powierzchniowe. Były nimi **Graniczne Reprezentacje B-Rep** (ang. *Boundary Representations*) składające się z wierzchołków, krawędzi i zorientowanych powierzchni tworzonych w oparciu o topologiczne dane determinujące sposób ich łączenia (rys. 11).



Rys. 11. Części składowe modelu bryłowego B-Rep (Granicznej Reprezentacji)

Do realizacji tych danych wykorzystano Twierdzenie Eulera o wielościanach, według którego dla dowolnego wielościanu prostego (np. czworościanu, sześcianu) zachodzi następujący związek między liczbą jego wierzchołków ( $V$ ), liczbą krawędzi ( $E$ ) i liczbą ścian ( $F$ ):

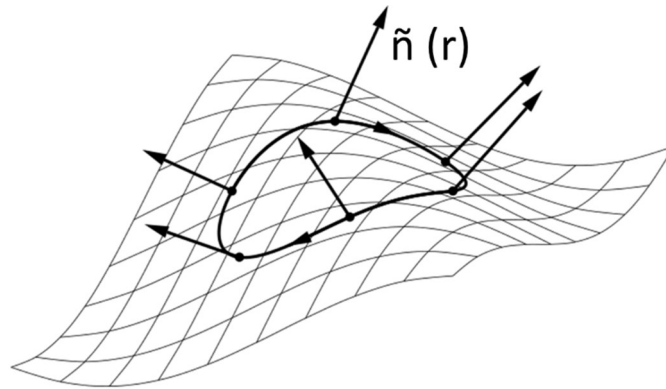
$$V - E + F = 2,$$

na przykład dla czworościanu  $V = 4$ ,  $E = 6$ ,  $F = 4$ , a więc:

$$4 - 6 + 4 = 2.$$

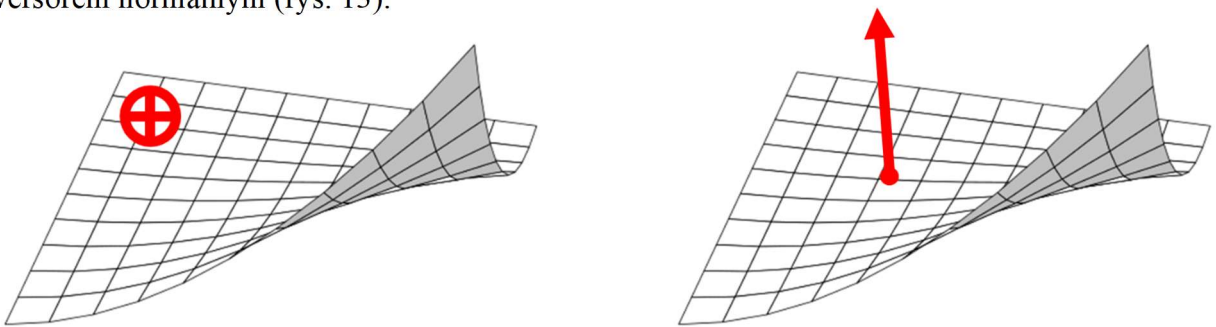
Wielościan nazywa się przy tym prostym (bez dziur), jeżeli da się go przekształcić w sposób ciągły (to znaczy zdeformować bez rozrywania) na sferę [17]. Oznaczało to, że każda krawędź modelu B-Rep zakończona była dwoma wierzchołkami i dzieliła tylko dwie powierzchnie, a każdy jej wierzchołek był otoczony przez pojedynczy ciąg powierzchni. Algorytmy matematyczne definiujące wnętrze takiej Granicznej Reprezentacji oparte były o wzór Gaussa-Ostrogradskiego umożliwiający zamianę całki powierzchniowej zorientowanej na całkę potrójną (objętościową) [17], a tym samym umożliwiającą identyfikację wnętrza modelu 3D.

W tym miejscu pracy autor chciałby zwrócić uwagę czytelnika na zagadnienie odnoszące się do powierzchni zorientowanych będących jednym z głównych składników modeli B-Rep, ale również będących jednym z głównych powodów, dla którego autor zdecydował się podjąć tematykę dotyczącą Modelowania Jednoznaczego. Większość tworzonej geometrii we współczesnych systemach CAD jest geometrią zorientowaną, to znaczy, że charakteryzuje się wektorem o określonym zwrocie. I tak, mówimy, że płat powierzchni jest dwustronny, jeżeli dla każdej krzywej zamkniętej położonej na nim, ale nie przecinającej brzegu, wektor normalny  $\vec{n}$  ( $r$ ) (wektor jednostkowy) zmieniający się w sposób ciągły po obejściu tej krzywej nie zmieni zwrotu (rys. 12).



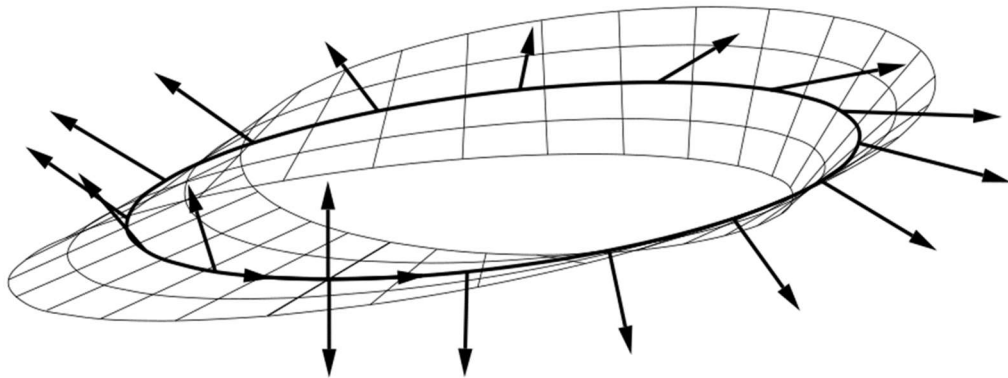
Rys. 12. Płat powierzchni dwustronny z widoczną na nim krzywą zamkniętą [14]

Płat powierzchni, na którym wyróżniono jedną ze stron, nazywamy płatem zorientowanym. Wyróżnioną stronę płata nazywamy dodatnią i oznaczamy znakiem „+” albo wskazujemy wektorem normalnym (rys. 13).



Rys. 13. Płat zorientowany z wyróżnioną jego stroną dodatnią [14]

Dodatkowo płaty, które nie są dwustronne nazywamy jednostronnymi (niezorientowanymi). Przykładem takiego płata jest wstęga Mobiusa. Wstęgę Mobiusa można otrzymać sklejjąc końce długiego paska papieru. Przed sklejeniem jeden z końców paska trzeba obrócić o  $180^\circ$  (rys. 14) [14].



Rys. 14. Płat niezorientowany – wstęga Mobiusa [14]

Co ciekawe, dzięki połączeniu dwóch rodzin wstęg Mobiusa można utworzyć zamkniętą powierzchnię zorientowaną w postaci tak zwanej butelki Kleina (rys. 15) [52].



Rys. 15. Powierzchnia zorientowana składająca się z dwóch rodzin wstęg Möbiusa – butelka Kleina [52]

Skąd zatem zainteresowanie autora geometrią zorientowaną? No cóż, zmienne zwroty wektorów krzywych, powierzchni czy płaszczyzn są jedną z głównych przyczyn dwuznaczności tworzonych modeli 3D we współczesnych systemach CAD, którą to dwuznaczność eliminuje zaproponowana przez autora idea Modelowania Jednoznacznego. Idea ta została opisana w Rozdziale 4 niniejszej pracy.

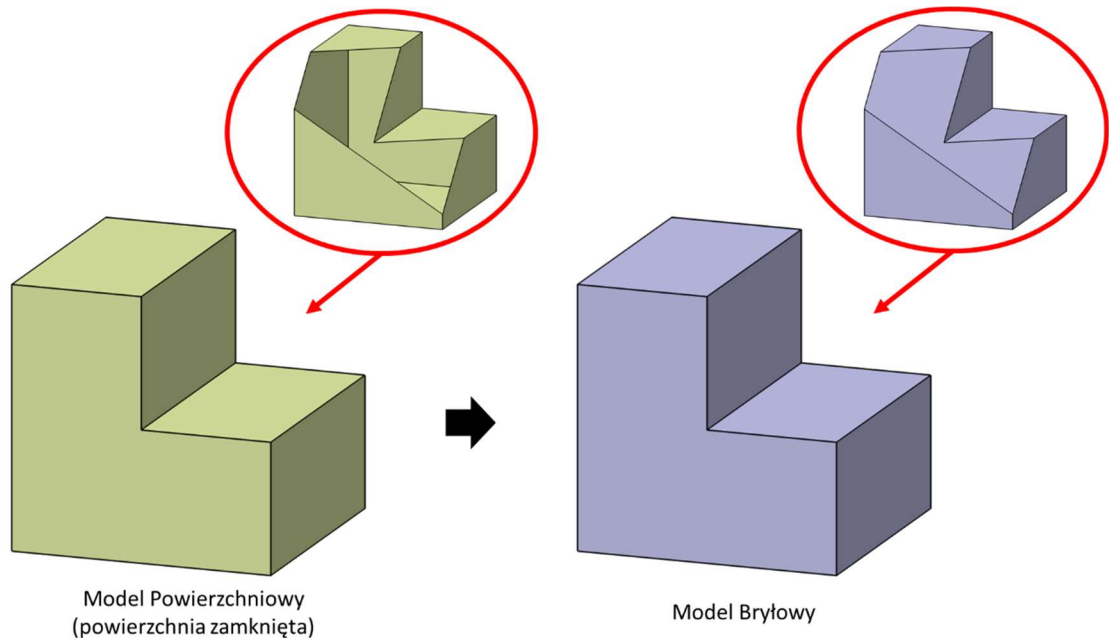
Wspomniana wcześniej wielorodność postaciowa modeli B-Rep przypominająca w swej naturze modele powierzchniowe wynikała z faktu, że występujące w nich powierzchnie graniczne mogły być reprezentowane nie tylko przez powierzchnie płaskie, ale również przez wcześniej opisane typy powierzchni, jak na przykład *B-Spline*. Co więcej, osiągnięcie spójności postaciowej wszystkich opisanych tu modeli bryłowych, oznaczającej między innymi brak wystających, a więc nadmiarowych krawędzi i powierzchni oraz brak ich nieciągłości geometrycznej, pozwoliła sferze naukowej i inżynierskiej na kontynuację badań w kierunku wykonania kolejnego kroku na drodze rozwoju technik modelowania.

#### 3.2.5 Modelowanie Hybrydowe (ang. *Hybrid Modeling*)

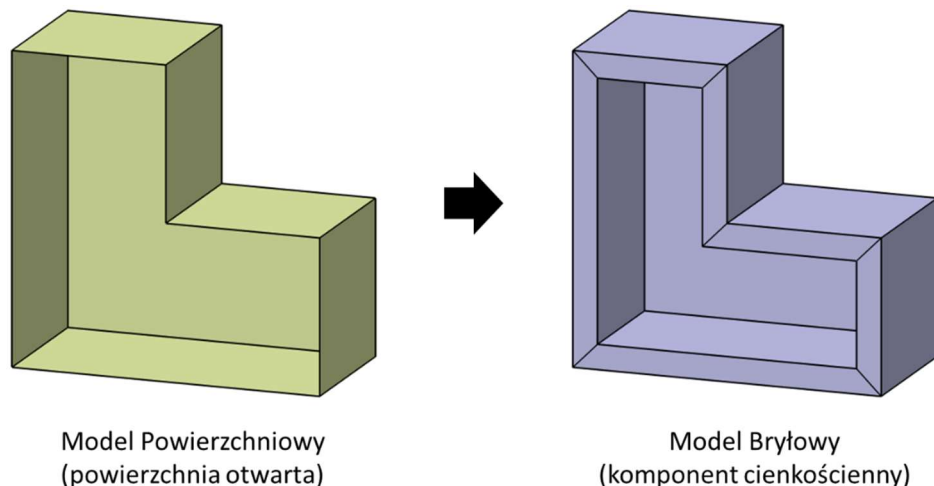
Modele bryłowe, mimo swej jednoznaczności geometrycznej, nie były pozbawione wad. Modele B-Rep w formie złożonych struktur wymagały dużej mocy obliczeniowej komputera. Ponadto już w latach 80-tych badania wykazały, że generowanie niektórych skomplikowanych kształtów w systemie CAD było problematyczne nawet dla tak zaawansowanej techniki, jak Modelowanie Bryłowe oparte na Granicznych Reprezentacjach. Modelowanie Powierzchniowe w dalszym ciągu pozostawało techniką umożliwiającą uzyskiwanie najbardziej złożonych strukturalnie postaci geometrycznych przy użyciu systemów CAD. Narodził się więc pomysł połączenia zalet Modelowania Bryłowego i Powierzchniowego w jedną technikę. Wcześniej opisane cechy definicji obu technik realizowanych w niezależnych środowiskach programowych danego systemu CAD musiały zatem funkcjonować w obrębie jednego zunifikowanego środowiska programowego. W gruncie rzeczy tym zunifikowanym środowiskiem pozostał sam system CAD, w którym wyodrębniono tak zwane moduły programowe realizujące cechy definicji Modelowania Bryłowego i Powierzchniowego. W konsekwencji użytkownik mógł wykorzystywać oba moduły współbieżnie, a proces powstawania jednego modelu, posiadającego jednocześnie cechy modelu bryłowego i powierzchniowego, nazwano Modelowaniem Hybrydowym [69]. Zatem proces



tworzenia **Modelu Hybrydowego** oparty był na definiowaniu zewnętrznych powierzchni komponentu, by na pewnym jego etapie przekształcić je w bryłę zachowując tym samym ich kształt i dodając jej wnętrze. Użytkownik w tym celu wykorzystywał powierzchnię zamkniętą – wypełniając ją wnętrzem (rys. 16) lub otwartą – dodając do niej grubość materiału, a tym samym tworząc komponent cienkościenny (rys. 17). Co więcej, tak przekształcony model bryłowy mógł być modyfikowany poprzez wykorzystanie dodatkowych narzędzi programowych Modelowania Bryłowego, jak i Modelowania Powierzchniowego.



Rys. 16. Wykorzystanie powierzchni zamkniętej do przekształcenia modelu powierzchniowego na model bryłowy



Rys. 17. Wykorzystanie powierzchni otwartej do przekształcenia modelu powierzchniowego na model bryłowy (komponent cienkościenny)

### 3.2.6 Podsumowanie

W taki oto sposób wykrystalizowały się rodzaje modeli CAD, które pozostają w użyciu do dziś. Każdy z tych rodzajów pozostaje nierozdzielnie związany z techniką modelowania wykorzystywaną do ich tworzenia:

- modele 2D (Dwuwymiarowe) → Modelowanie Dwuwymiarowe,
- modele krawędziowe → Modelowanie Krawędziowe,
- modele powierzchniowe (Powierzchnie Parametrycznie Swobodne) → Modelowanie Powierzchniowe,
- modele bryłowe → Modelowanie Bryłowe,
- modele hybrydowe → Modelowanie Hybrydowe.

Należy jednak zwrócić uwagę, że sposób tworzenia poszczególnych rodzajów modeli we współczesnych systemach CAD jest dla konstruktora prostszy, ale też inny niż w momencie krystalizowania się każdego z tych rodzajów. Podstawową tego przyczyną jest obecna dziś – w praktycznie wszystkich systemach CAD – kolejna technika modelowania, na podstawie której oparty jest interfejs użytkownika tych systemów, nie będąca powiązaną z jednym rodzajem modeli i sprawiająca, że konstruktor nie musi być już specjalistą w zakresie matematycznego definiowania odpowiedniego rodzaju krzywych i powierzchni czy dobierania parametrów topologii poszczególnych brył. Wybór odpowiedniego algorytmu matematycznego jest coraz częściej dokonywany przez system CAD z uwzględnieniem wymagań zdefiniowanych przez konstruktora [62]. Zatem tworzenie modeli we współczesnym systemie CAD zdeterminowane jest jego interfejsem użytkownika „narzucającym” mu niejako generowanie kolejnych części geometrii w oparciu o tak zwane Cechy Geometryczne. CzuJNI czytelnik zwróci w tym miejscu uwagę, że w związku z powyższym niektóre techniki modelowania muszą przenikać się wzajemnie w taki sposób, że jedna z nich jest nadrzędna do innej – i tak jest w istocie. Oznacza to, że na przykład użytkownik tworzący Model Hybrydowy korzysta jednocześnie z Cech Geometrycznych w postaci krzywych, powierzchni czy brył, bo system CAD, na którym pracuje w taki właśnie sposób ową geometrię generuje. Analogicznie w Modelowaniu Jednoznacznym użytkownik będzie wykorzystywał jego wytyczne korzystając przy tym z szeregu innych dostępnych metod modelowania. Ale skoro konstruktor nie musi być dziś specjalistą w zakresie automatycznego definiowania i wyboru przez system CAD odpowiednich algorytmów dla danej geometrii, to czy jest on zwolniony ze znajomości choćby podstaw matematycznych, na jakich te systemy są oparte? Według autora nie, bo taki automatyczny wybór nie zawsze jest najlepszy i konstruktor musi czasami „ręcznie” zmodyfikować rozwiązanie proponowane przez system CAD [62]. Czasem warto też patrzeć dalej i szerzej w kontekście podstaw, a co za tym idzie bazowych możliwości komputerowego wspomaganie projektowania, by dostrzec „nowe stare” rozwiązania, które od dawna mogą się w nim znajdować, a które nie zostały jeszcze do końca zbadane i zaimplementowane do praktyki projektowej. W tym miejscu autor ponownie nawiązuje do proponowanej metodyki Modelowania Jednoznacznego i zachęca czytelnika do zgłębiania poruszanej tu tematyki koniecznie jednak rozpoczynając od fundamentów, na jakich zbudowane są systemy komputerowego wsparcia inżynierskiego.

#### **3.3 Techniki Modelowania Jednoznacznego**

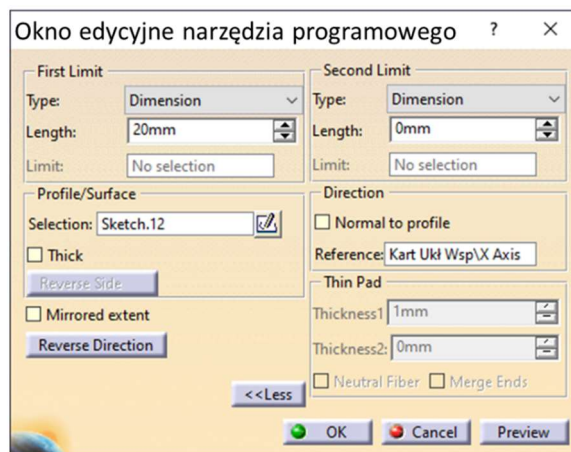
W punkcie tym opisane zostały techniki wchodzące w bezpośredni skład Modelowania Jednoznacznego. Nie oznacza to jednak, że użytkownik je wykorzystujący będzie zobligowany do ich stosowania, by wypełnić założenia Modelowania Jednoznacznego. Natomiast autor wskazuje te techniki, które w jego opinii przyczyniają się do optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD w sposób większy niż inne. Należy też mieć na uwadze, że wcześniej opisane techniki tworzenia modeli 3D są, w zależności od rodzaju użytego modelu, obligatoryjne, gdyż stanowią podstawę do uzyskania modeli krawędziowych, bryłowych, powierzchniowych i hybrydowych, na których opiera się ta, jak i każda inna technika modelowania w systemach CAD.

### 3.3.1 Modelowanie w oparciu o Cechy Geometryczne (ang. *Feature-Based Modeling*)

Implementacja Modelowania w oparciu o Cechy Geometryczne do systemów komputerowego wspomaganie projektowania, czyniąc je tym samym systemami opartymi w swoich fundamentach o tę technikę, była – w opinii autora – równie przełomowa co pierwsze zastosowania komputerów w pracach inżynierskich. Implementacja ta wyniknęła z potrzeby połączenia systemów CAD z komputerowo wspomaganym planowaniem procesów CAPP (ang. *Computer Aided Process Planning*). Zakres systemów CAPP obejmował wspomaganie prac związanych z programowaniem urządzeń sterowanych numerycznie oraz wspomaganie wszystkich metod i technik technologicznego przygotowania produkcji realizowanych w konwencjonalnych technologiach [7]. Ówczesni inżynierowie i badacze sięgając do dziedziny psychologii i analizując procesy poznawcze, a zwłaszcza proces myślenia będący najbardziej złożonym procesem psychicznym człowieka [32] założyli, że praca z użyciem systemów CAD będzie efektywniejsza, jeśli tworzona przez jego użytkownika geometria będzie w większym stopniu odnosiła się do jej rzeczywistej formy. Wynikało to z faktu, że najistotniejszą cechą myślenia jest to, że za jego pomocą tworzy się pewien model rzeczywistości. W początkowych fazach rozwoju poznawczego myślenie polega na dokonywaniu manipulacji na rzeczywistych przedmiotach. W toku tego rozwoju manipulacje te ulegają uwewnętrznieniu, czyli interioryzacji i to one stanowią procesy myślowe człowieka dorosłego [32]. Naukowcy w swych badaniach wykazali więc, że tworzona przez konstruktora geometria przy użyciu żeber, otworów gwintowych czy kół zębatych w większym stopniu odzwierciedlała efekt końcowy w postaci wytworu, bo składała się z elementów dobrze znanych konstruktorowi, a więc z rzeczywistych przedmiotów, co w konsekwencji pozytywnie wpływało na jego procesy myślowe. Co więcej, opisana w ten sposób geometria pozwoliła zwiększyć efektywność całego procesu projektowo-konstrukcyjnego oraz procesu produkcyjnego, bo łatwiej było formułować na przykład proces technologiczny koła zębatego, niż samej geometrii, która owo koło zębate przypominała.

Pierwszym, któremu udało się opracować algorytm rozpoznający cechy na bazie topologii geometrii 3D był Lyc Kyprianou, który w 1980 roku przedstawił go w swojej pracy doktorskiej „*Shape classification in Computer-Aided Design*” [27]. Większość późniejszych metod rozpoznawania cech geometrycznych bazowała na algorytmie Kyprianou. Koncept projektowania przez cechy (ang. *Design by Features*) pierwszy raz został zaproponowany przez M. J. Pratta i P. R. Wilsona [37], natomiast jego komercyjne zastosowanie wydarzyło się pod koniec lat 80-tych. Wówczas systemem, do którego wdrożono projektowanie przez cechy był Pro-Engineer (obecnie Creo Parametric), a w latach 90-tych nastąpiła implementacja tej koncepcji do innych systemów CAD między innymi do Unigraphics (obecnie NX) i CATIA.

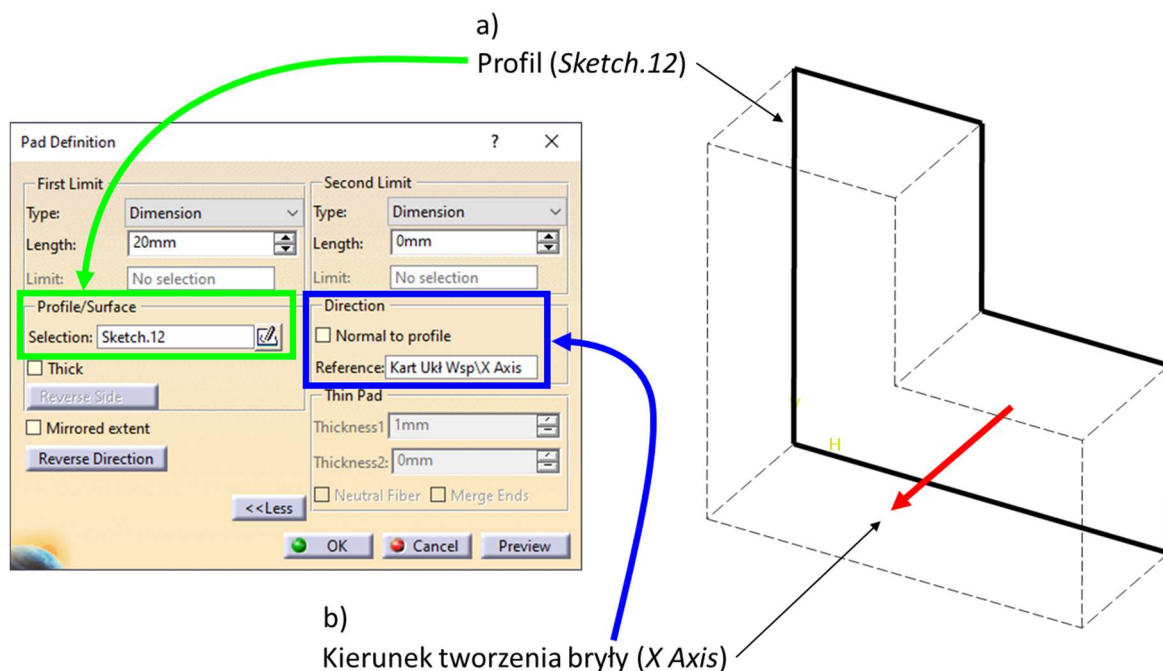
Przełomowa, w opinii autora, była zmiana definiowania geometrii przez użytkownika, który od tej pory korzystał z intuicyjnych narzędzi programowych w postaci okien edycyjnych zawierających atrybuty charakterystyczne dla danej cechy (rys. 18).



Rys. 18. Przykładowe okno edycyjne narzędzia programowego służącego do tworzenia bryły na bazie profilu

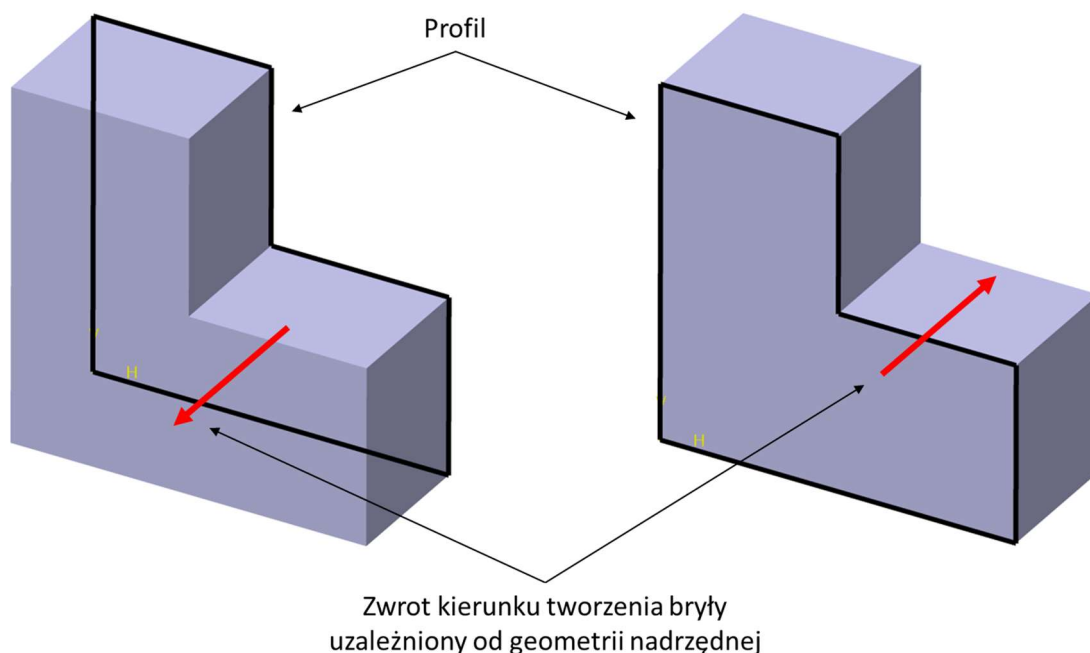
Użytkownik mógł modyfikować te atrybuty poprzez zmianę ich parametrów i wpływać w ten sposób na kształt tworzonej geometrii. Tym samym zaimplementowanie techniki modelowania w oparciu o cechy do systemów CAD umożliwiło wdrożenie parametryczności, w dzisiejszym tego słowa rozumieniu, pozwalającą na edycję, dodawanie i usuwanie więzów geometrycznych – postaciowych, jak i wymiarowych. „W dzisiejszym tego słowa rozumieniu” oznacza również możliwość tworzenia powiązań, a zatem tworzenia asocjatywności między więzami geometrycznymi, a modelem 3D. Oba te terminy – parametryczność i asocjatywność – wynikają bowiem jeden z drugiego. Początkowo parametryczność nazywano Elastycznym Spełnianiem Ograniczeń (ang. *Flexible Constraint Satisfaction*) i traktowano jak rozwinięcie jej pierwotnej wersji – Sztywnego Spełniania Ograniczeń. Współcześnie nazwa ta przybrała formę Parametrycznego Asocjatywnego Projektowania PAD (ang. *Parametric Associative Design*) [53]. Wdrożenie parametryczności do systemów CAD pozwoliło zastąpić proces tworzenia ograniczeń geometrycznych w ściśle określonej sekwencji wykorzystując tak zwane algorytmy deklaratywne, czyli algorytmy opisujące warunki, jakie musi spełniać końcowe rozwiązanie, a nie szczegółową sekwencję kroków, które do niego prowadzą [38].

O ile we wczesnych koncepcjach opisywanej techniki tworzona geometria dostarczała użytkownikowi podstawowych informacji na temat jej rodzaju, wymiarów czy specyfikacji materiałowej, tak dzisiejsze systemy oparte o cechy geometryczne tę funkcjonalność poszerzają umożliwiając generowanie każdej dostępnej dla danego systemu geometrii w oparciu o definiowanie jej atrybutów poprzez wybór odpowiedniego narzędzia programowego i wyznaczenie parametrów i powiązań tych atrybutów. Przykładowo, utworzenie bryły na bazie profilu oznacza wybranie odpowiedniego narzędzia programowego i zdefiniowanie wymaganych przez to narzędzie atrybutów. Użytkownik wskazuje więc wcześniej przygotowany profil oraz kierunek tworzenia bryły (rys. 19).



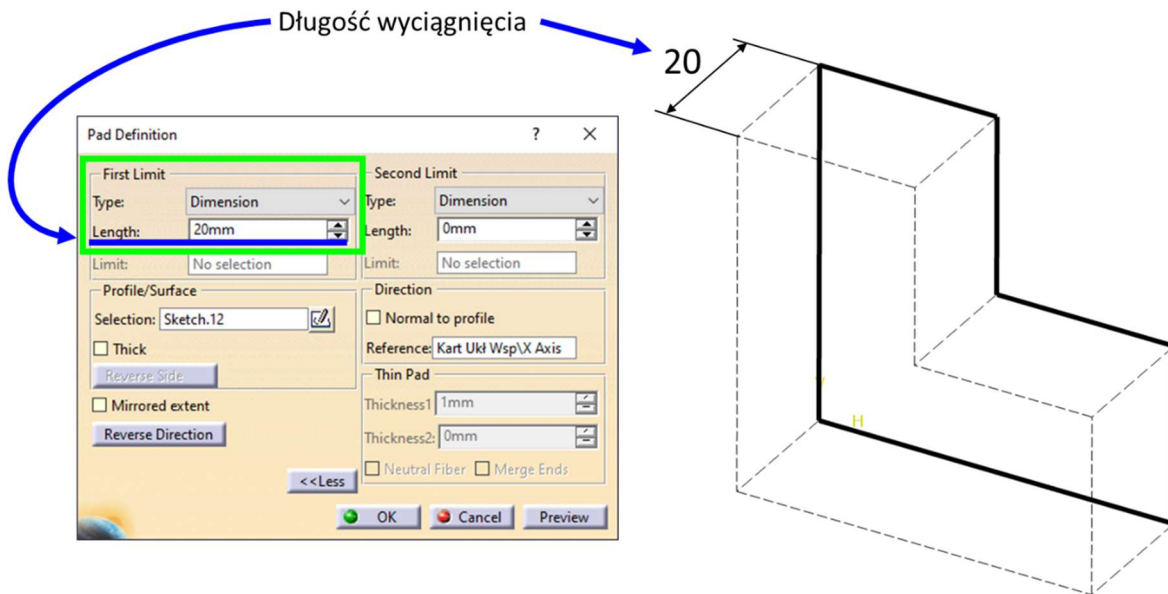
Rys. 19. Tworzenie bryły na bazie profilu: a) wskazanie profilu, b) wskazanie kierunku tworzenia bryły

Skoro wymagane jest wskazanie kierunku wektora, to zgodnie z opisaną wcześniej koncepcją geometrii zorientowanej występującej we współczesnych systemach CAD należy w tym miejscu podać jego zwrot. Ale czy jego podanie będzie oznaczało, że wynik końcowy tworzenia bryły zawsze będzie taki sam niezależnie od danych wejściowych jakimi w tym przypadku są profil i kierunek? Niestety nie, bo jeśli zwrot wektora geometrii zorientowanej nadrzędnej do tych danych wejściowych zmieni się, to ta zmiana wpłynie również na ich orientację, a w konsekwencji na bryłę. W ten sposób bryła może zostać wygenerowana po drugiej stronie profilu (rys. 20).

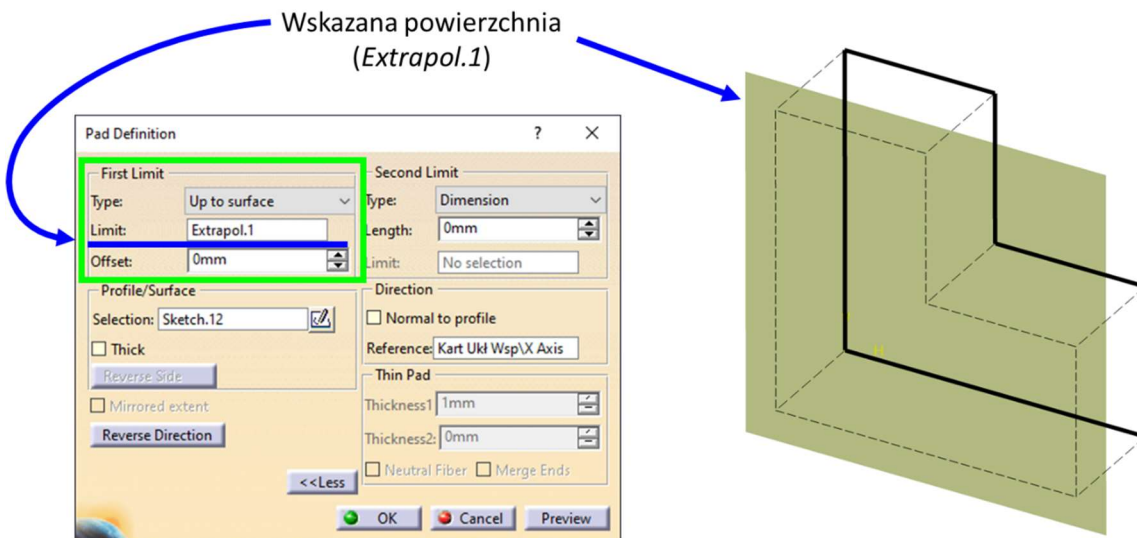


Rys. 20. Wpływ nadrzędnej geometrii zorientowanej na sposób generowania bryły – bryła z jednej lub z drugiej strony profilu

Zatem zachodzi potrzeba wyeliminowania tej dwuznaczności tak, by użytkownik miał pewność, że wynik końcowy użycia wybranego narzędzia programowego zawsze będzie taki jak podczas początkowej definicji geometrii. Pozostawiając jednak problem dwuznaczności na dalszy etap rozważań niniejszej pracy, użytkownik przechodzi do wypełniania kolejnych pól atrybutów. Ważną kwestią jest określenie granicy, do której będzie tworzona bryła, czyli inaczej określenie tak zwanej granicy wyciągnięcia bryły. W pierwszej sekcji *First Limit* można zdefiniować typy (*Type*) określania granicy wyciągnięcia oraz atrybuty związane z tym typem. W zależności od wybranego typu pozostałe atrybuty w tej sekcji ulegają zmianie. Dla pokazanego na rysunku 21 typu *Dimension* (wyciągnięcie na zadany wymiar) podstawowym atrybutem jest długość wyciągnięcia (*Length*), a dla typu granicy wyciągnięcia zdefiniowanego przez wskazaną powierzchnię (*Up to surface*) atrybutami są *Limit* – wskazana powierzchnia i *Offset* – przesunięcie od wskazanej powierzchni (rys. 22).



Rys. 21. Definiowanie granicy wyciągnięcia bryły typu *Dimension* (wyciągnięcie na zadany wymiar)

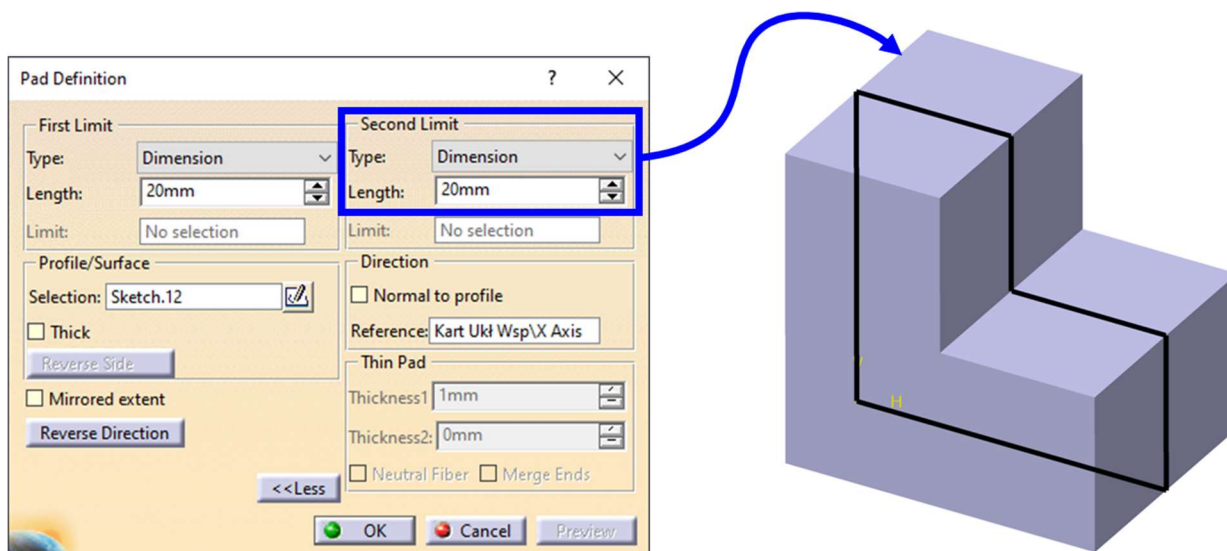


Rys. 22. Definiowanie granicy wyciągnięcia bryły typu *Up to surface* (wyciągnięcie do wskazanej powierzchni)

Możliwy jest wybór następujących typów granic wyciągnięcia:

- *Dimension* – wyciągnięcie na zadany wymiar,
- *Up to next* – wyciągnięcie do najbliższej napotkanej powierzchni,
- *Up to last* – wyciągnięcie do ostatniej napotkanej powierzchni,
- *Up to plane* – wyciągnięcie do wskazanej płaszczyzny,
- *Up to surface* – wyciągnięcie do wskazanej powierzchni [45].

W przypadku typu *Up to next* i *Up to last* granica wyciągnięcia zostaje rozpoznana przez program automatycznie. Dodatkowo można określić tylko przesunięcie od tej granicy (*Offset*). Dla typów *Up to plane* i *Up to Surface* należy wskazać granicę w formie odpowiedniej płaszczyzny lub powierzchni. W tym przypadku istnieje także możliwość zdefiniowania przesunięcia tej granicy (*Offset*). Po rozszerzeniu okna o dodatkowe opcje możliwe jest określenie dodatkowych atrybutów. Podstawową grupą atrybutów z dalszej części okna jest druga granica wyciągnięcia (*Second Limit*) (rys. 23).



Rys. 23. Zdefiniowana druga granica wyciągnięcia bryły typu *Dimension* (wyciągnięcie na zadany wymiar)

Możliwe są do zdefiniowania takie same typy, jak w przypadku pierwszej granicy. Zarówno pierwsza jak i druga granica może być zdefiniowana w domyślnej opcji wymiarowej z dodatnimi, zerowymi lub ujemnymi wartościami lub poprzez inny jej typ [45].

Tak więc wykorzystując jedno narzędzie programowe użytkownik definiuje atrybuty generowanej za jego pomocą geometrii nadając im określone parametry i powiązania. W jednym narzędziu „spotykają się” parametryczność, asocjatywność, ale również potencjalna dwuznaczność występująca niemal na każdym kroku procesu tworzenia modelu 3D. Wprowadzenie do przemysłu modelowania w oparciu o cechy geometryczne rozpoczęło nowy rozdział rozwoju systemów CAD – systemów intuicyjnych i przyjaznych użytkownikowi, kończąc tym samym rozdział, w którym bazowano na standardowym modelowaniu geometrycznym czyniącym proces konstruowania żmudnym i wymagającym wiedzy z zakresu matematyki często wykraczającej poza kompetencje inżyniera konstruktora.

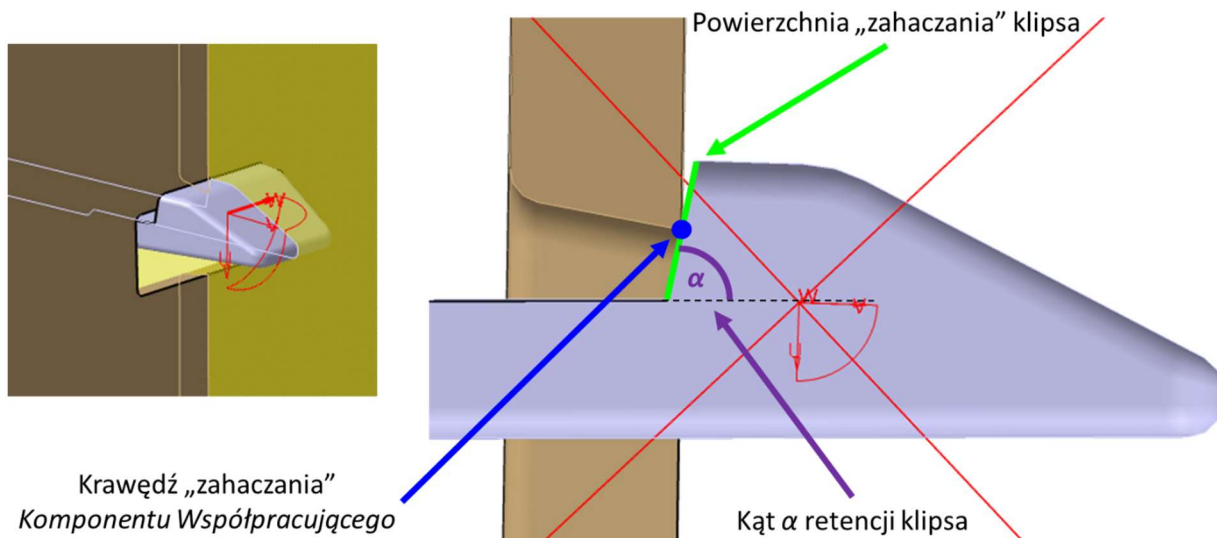
### 3.3.2 Modelowanie Poziome (ang. *Horizontal Modeling*)

O ile wykorzystanie cech geometrycznych jest w proponowanej metodyce Modelowania Jednoznacznego obligatoryjne ze względu na ich wszechobecne zastosowanie we współczesnych

systemach CAD, tak kolejna technika jest dla tej metodyki nie tyle obligatoryjna, ile zalecana przez autora ze względu na pożądany sposób budowania struktury modelu 3D i na konsekwencje jaki ten sposób za sobą niesie. Wymaga on co prawda od konstruktora przemysłanego dodawania kolejnych operacji modelowania i nieustannego optymalizowania całej struktury, lecz uzyskana w ten sposób sieć powiązań między tymi operacjami tworzy spójną i logiczną całość [49]. To z pozoru oczywiste wymaganie jest trudne do zrealizowania nawet dla doświadczonego konstruktora, bo o owej przemysłanej sieci powiązań decydują szczegóły, które w procesie tworzenia topologii modelu 3D są łatwe do przeoczenia.

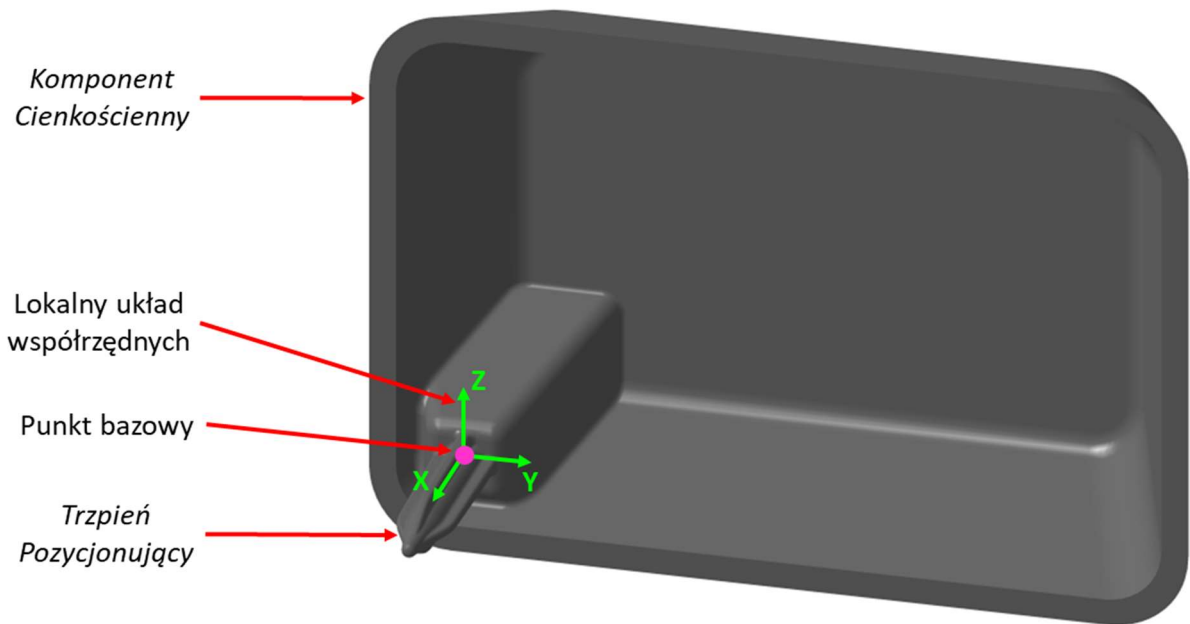
W pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę, że fundamentalną składową Modelowania Poziomego jest wykorzystanie wybranej geometrii występującej w modelowaniu powierzchniowym lub bryłowym, pełniącej rolę danych wejściowych dla podrzędnych jej operacji, w charakterze tak zwanych elementów podstawowych danej topologii modelu 3D. Oznacza to, że elementy te są wspólne dla tych podmiotów modelu 3D, w których zachodzi potrzeba utworzenia relacji wynikająca między innymi z tego samego położenia części składowych tych podmiotów lub tego samego ich kształtu. Przykładowo:

- jeżeli powierzchnia definiująca kąt  $\alpha$  retencji klipsa *Komponentu Cienkościennego*, a więc powierzchnia „zahaczania” z otworem *Komponentu Współpracującego*, jest zdefiniowana w oparciu o linię, to krawędź tego otworu, na której następuje „zahaczanie” musi odwzorowywać kształt tej powierzchni, zatem musi być również zdefiniowana na linii leżącej na tej samej powierzchni (rys. 24);
- jeżeli *Trzpień Pozycjonujący Komponentu Cienkościennego* wykonanego z tworzywa sztucznego zlokalizowany jest w jednym z jego naroży, to części składowe tego trzpienia powinny odnosić się do tego samego położenia zdefiniowanego na podstawie na przykład lokalnego układu współrzędnych opartego na punkcie bazowym (rys. 25).



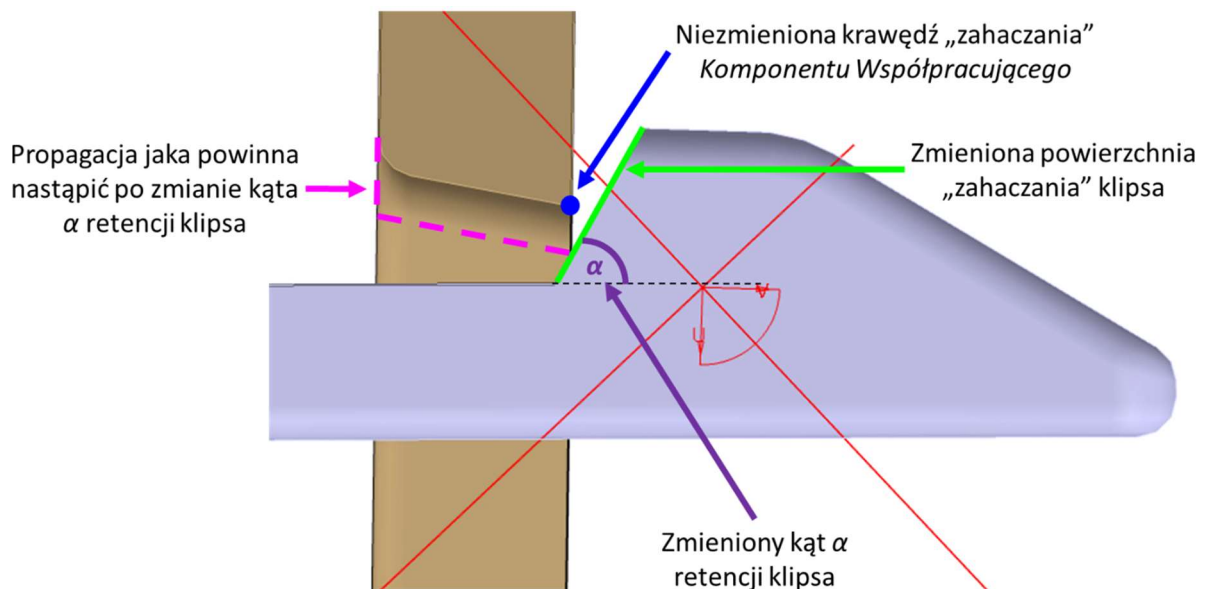
Rys. 24. Powierzchnia „zahaczania” definiująca kąt  $\alpha$  retencji klipsa *Komponentu Cienkościennego*, poprzez którą zdefiniowano krawędź „zahaczania” *Komponentu Współpracującego*





Rys. 25. *Trzpień Pozycjonujący* będący podmiotem *Komponentu Cienkościennego*, którego wszystkie części składowe zbudowano na podstawie lokalnego układu współrzędnych opartego na jego punkcie bazowym

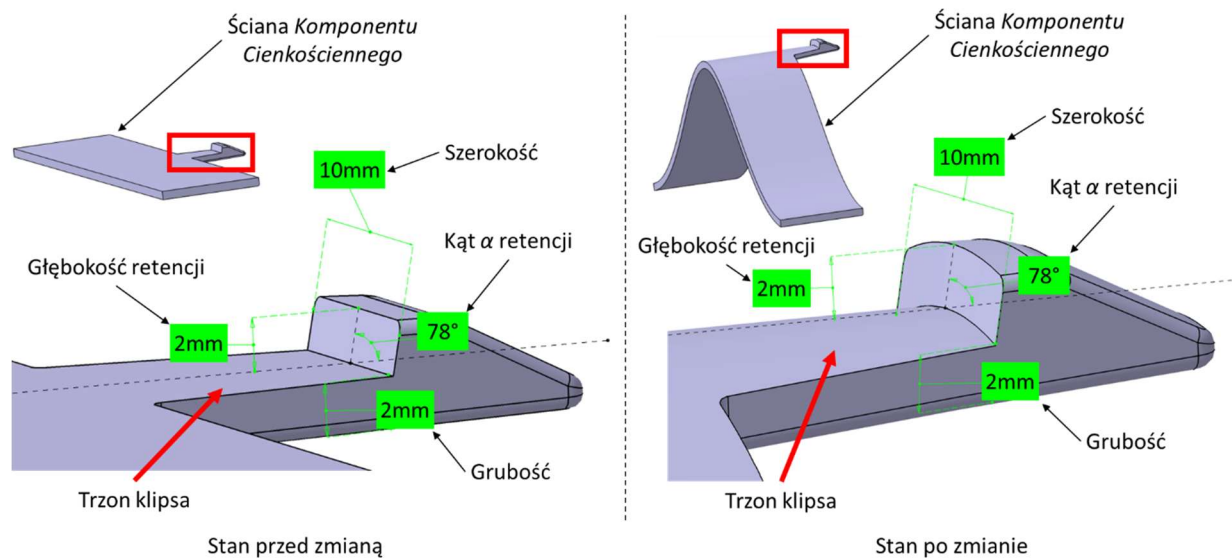
Co się stanie w momencie zmiany powierzchni definiującej kąt retencji klipsa, gdy krawędź otworu została utworzona na takiej samej, ale nie tej samej powierzchni? Wówczas propagacja zmiany w *Komponencie Współpracującym* nie nastąpi, zatem połączenie „klips – otwór” utraci swą funkcjonalność (rys. 26).



Rys. 26. Brak propagacji zmiany kąta  $\alpha$  retencji klipsa *Komponentu Cienkościennego* w *Komponencie Współpracującym* spowodowany brakiem elementu wspólnego (podstawowego) dla obu geometrii

Idąc dalej tym tokiem rozumowania – jak powinien „zachować” się klips w momencie zmiany geometrii ściany, na której został on wygenerowany? Z pewnością jego trzon powinien dostosować się do nowego kształtu ściany. Ale czy jego pozostała geometria definiująca takie parametry jak: kąt retencji, głębokość retencji, grubość, szerokość, pochylenia technologiczne

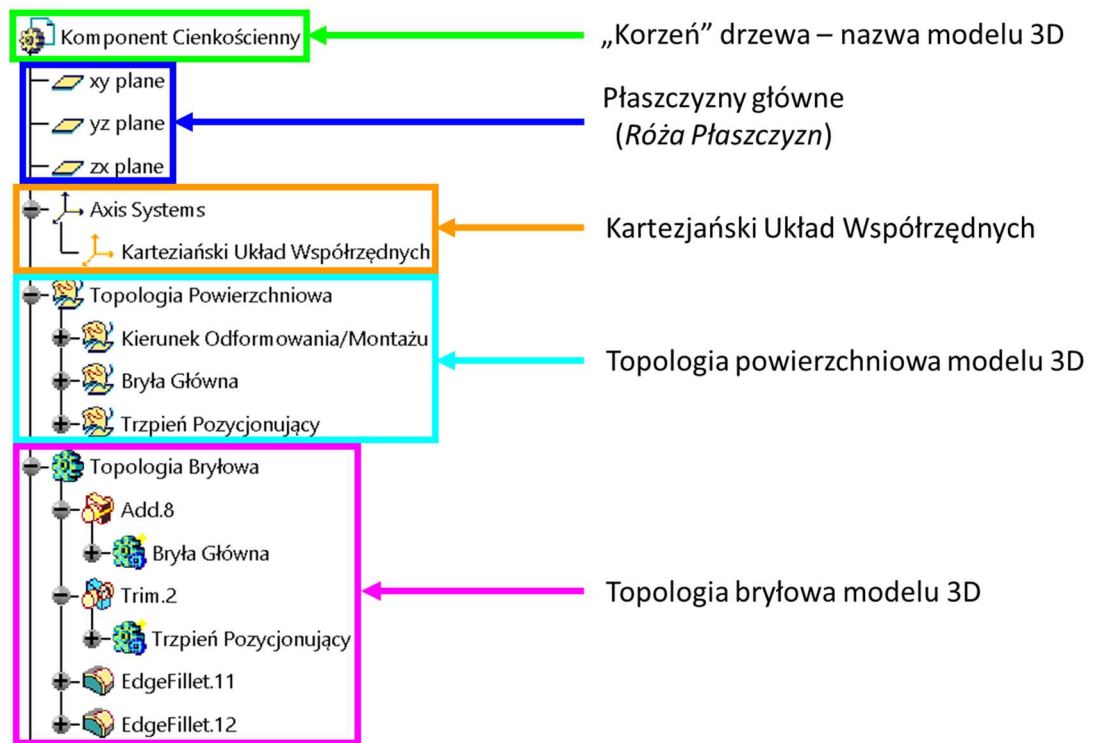
bocznych ścian, powinny się również zmienić? Odpowiedź na to pytanie jest przecząca, bo sieć powiązań między operacjami modelu 3D nie sprowadza się do tworzenia zależności „każdy z każdym”, lecz powinna stanowić spójną i logiczną całość. Powyższą ideę ilustruje rysunek 27.



Rys. 27. Zmiana geometrii ściany *Komponentu Cienkościennego* wpływająca na zmianę trzonu klipsa, ale nie wpływająca na geometrię definiującą jego ważne, z punktu widzenia funkcjonalności, wymiary

Zastosowanie elementów podstawowych w technice Modelowania Poziomego jest przykładem pewnego rodzaju planowania, które konstruktor przeprowadza przed rozpoczęciem konstruowania danego fragmentu topologii modelu 3D. Dlatego też można stwierdzić, że topologię każdego modelu 3D należy tworzyć z uwzględnieniem warunków projektowo-konstrukcyjnych w skali makro, a nie mikro. Odwołując się do dziedziny filozofii, człowiek posługuje się pewnego rodzaju rozumowaniem, czyli inaczej wnioskowaniem, którego podstawą są tak zwane stosunki konieczności, które łączą prawdziwość lub fałszywość jednego sądu z prawdziwością lub fałszywością sądu drugiego. Jeśli przyjąć, że tymi stosunkami są stosunki racji i następstwa, to konstruktor tworząc topologię modelu 3D zawsze powinien kierować się zasadą polegającą na wyprowadzaniu następstw z danych racji. W filozofii zasadę tę nazywa się wnioskowaniem dedukcyjnym, szerzej znanym jako wnioskowanie „od ogółu do szczegółu” [29].

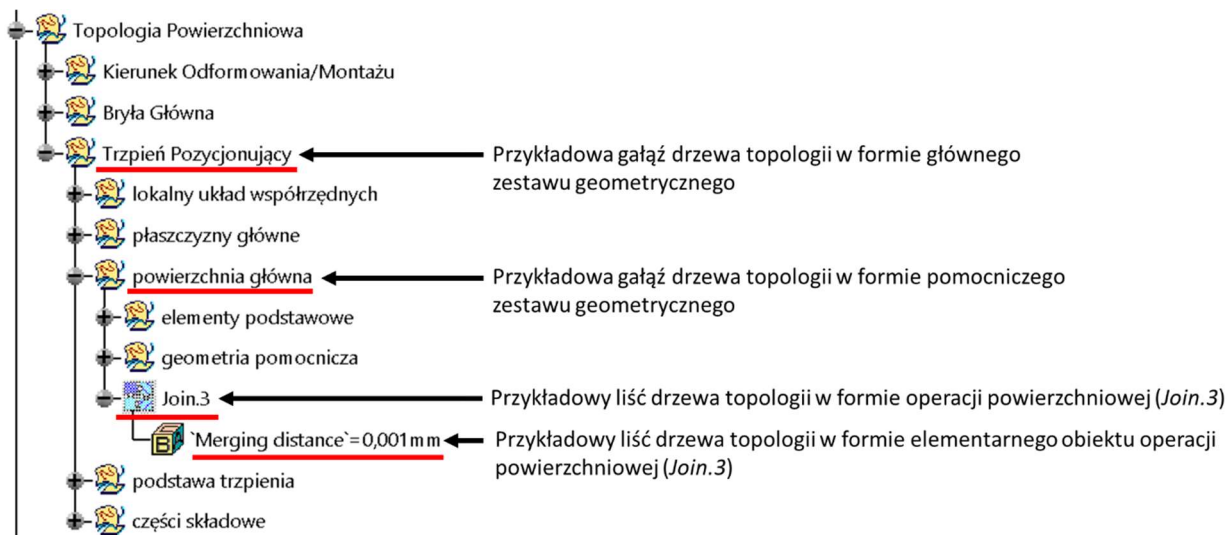
Kontynuując wątek budowy modeli CAD rysunek 28 przedstawia tak zwane drzewo struktury przykładowego modelu 3D, które „rozsztala się” od „korzenia” reprezentowanego w formie nazwy tego modelu [68] i które odzwierciedla jego postać geometryczną. Drzewo struktury modelu 3D składa się z dwóch zależnych topologii: powierzchniowej i bryłowej. Zależność ta jest jednostronna to znaczy, że geometria bryłowa jest zbudowana w oparciu o geometrię powierzchniową stanowiącą pewnego rodzaju szkielet dla geometrii bryłowej.



Rys. 28. Przykładowe drzewo struktury modelu 3D

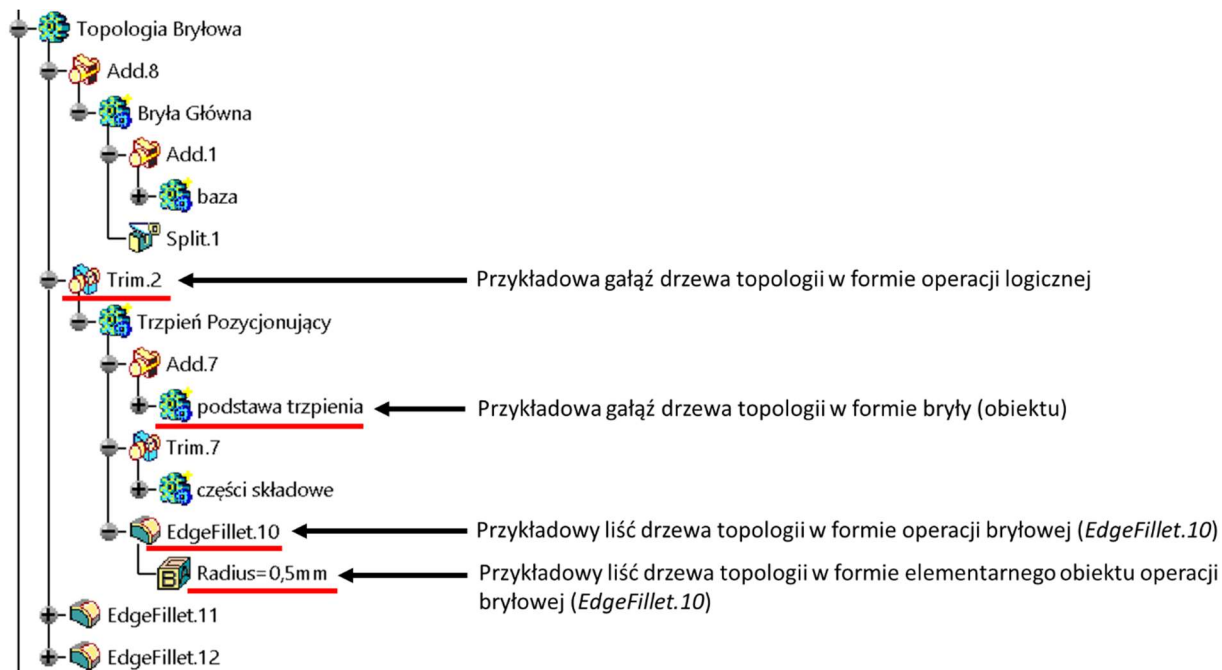
Szkieletowa forma całkowitej topologii modelu 3D odnosi się także do samej topologii powierzchniowej oraz bryłowej i wynika z idei stosowania w nich elementów podstawowych. Z tego względu Modelowanie Poziome jest również nazywane Modelowaniem w oparciu o Szkielet (ang. *Skeleton-Based Modeling*). Autor zwraca szczególną uwagę na wspomnianą jednostronną zależność obu topologii i odradza użytkownikowi zmianę jej kierunku doprowadzając tym samym do jej zapętlenia. Oczywiście są wyjątki od tej reguły, jednak są one rzadko spotykane, a ich zastosowanie wymaga od konstruktora dużego doświadczenia i świadomości tworzonej przez siebie struktury modelu. Autor w tym miejscu chciałby nadmienić, że topologia powierzchniowa jak i bryłowa to nie tylko same powierzchnie i bryły, ale również geometria je tworząca, taka jak: punkty, linie, płaszczyzny, profile, układy współrzędnych. Można więc stwierdzić, że geometria ta w obecnych systemach CAD jest uniwersalna, bo użytkownik ma do niej dostęp w większości technik modelowania.

Topologia powierzchniowa modelu 3D składa się z zestawów geometrycznych pełniących rolę głównych i pomocniczych zbiorów geometrii definiujących jego części składowe, a każdy z tych zestawów jest jednocześnie swego rodzaju gałęzią drzewa tej topologii. Dalsza analogia do drzewa może prowadzić do wniosków, że wszystkie operacje wykonane w procesie modelowania powierzchniowego wraz z ich elementarnymi obiektami [68] są jego „liśćmi”, które „wyrastają” z każdej jego gałęzi (rys. 29).



Rys. 29. Przykładowa topologia powierzchniowa modelu 3D

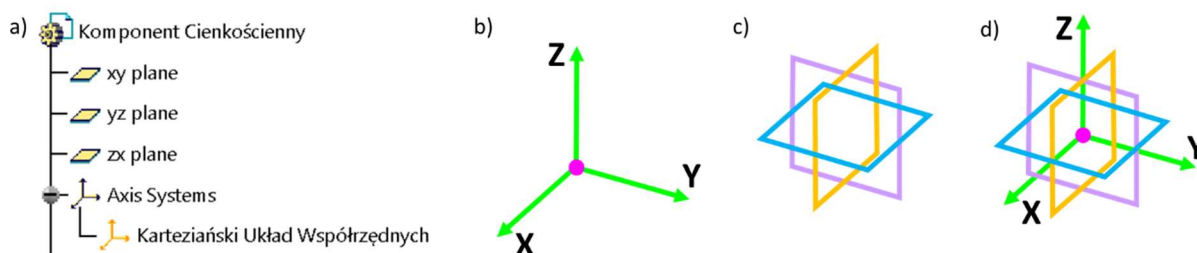
Podobnie jest z topologią bryłową z tą różnicą, że zamiast zestawów geometrycznych funkcję gałęzi pełnią połączenia kolejnych brył wchodzących w skład modelu 3D realizowane poprzez wykorzystanie opisanych w punkcie 3.2.4 Rozdziału 3 operacji logicznych, a także same bryły w formie bazowej lub w formie bryłowych elementów podstawowych – w dalszej części pracy nazwane obiektami. „Liśćmi” drzewa ponownie mogą być uznane poszczególne operacje modelowania, w tym przypadku bryłowego oraz ich elementarne obiekty (rys. 30).



Rys. 30. Przykładowa topologia bryłowa modelu 3D

Zadaniem konstruktora w dążeniu do uzyskania wymaganej geometrii modelu 3D wykorzystując technikę Modelowania Poziomego jest formowanie kolejnych gałęzi i liści drzewa struktury tego modelu w taki sposób, aby tworzyły harmonijny i spójny układ. W konsekwencji kolejne operacje tego drzewa wynikają jedna z drugiej. Im więcej uwagi konstruktor poświęca na tę wynikowość, a więc na relacje między poszczególnymi operacjami, tym bardziej zbliża się do uzyskania optymalnego rezultatu swojej pracy. A ponieważ „praktyka czyni mistrza”, to z każdym kolejnym

„drzewem” droga do owej optymalizacji powinna być coraz krótsza. Drzewo struktury każdego modelu 3D, oprócz topologii powierzchniowej i bryłowej, zawiera *Kartezjański Układ Współrzędnych* oraz płaszczyzny główne tego układu, zwane też inaczej *Różą Płaszczyzn* (rys. 28 i rys. 31) [68].



Rys. 31. *Kartezjański Układ Współrzędnych* i jego płaszczyzny główne: a) reprezentacja układu i jego płaszczyzn w drzewie struktury modelu, b) reprezentacja układu w przestrzeni 3D, c) reprezentacja płaszczyzn w przestrzeni 3D w formie *Róży Płaszczyzn*, d) reprezentacja układu i jego płaszczyzn w przestrzeni 3D

Zdaniem autora należy je traktować jak potencjalne bazowe elementy podstawowe, innymi słowy jak elementy wspólne przyszłej geometrii, generowane automatycznie po utworzeniu nowego pliku CAD. Jeśli zatem każdy nowo powstały plik CAD posiada takie same elementy podstawowe, to konstruktor tworząc model 3D z myślą o implementacji jego podmiotów do innych modeli 3D powinien mieć je na uwadze, gdyż są one uniwersalnym punktem odniesienia w procesie kopiowania danego podmiotu z jednego pliku CAD do drugiego. Oczywiście nie jest też tak, że bazy *Kartezjański Układ Współrzędnych* i jego płaszczyzny główne zawsze będą gwarantowały realizację tego procesu w sposób bezproblemowy, bo oprócz nich często zachodzi potrzeba zdefiniowania dodatkowej geometrii pełniącej rolę danych wejściowych tworzonego podmiotu. Jednak główną przeszkodą na drodze do uzyskania powtarzalnej i wolnej od błędów sekwencji kopiowania danego podmiotu do innego modelu 3D jest ponownie dwuznaczność geometryczna wynikająca z architektury współczesnych systemów CAD bazujących na geometrii zorientowanej.

Podczas tworzenia drzewa struktury modelu 3D przy użyciu techniki Modelowania Poziomego należy pamiętać o zachowaniu tak zwanego „złotego środka”. Utworzenie drzewa ze zbyt małą liczbą gałęzi może oznaczać, że liczba liści na każdej z nich będzie zbyt duża, a co za tym idzie identyfikacja tego konkretnego, szukanego przez użytkownika liścia, utrudniona. Z drugiej strony zbyt duża ilość gałęzi może doprowadzić do sytuacji, w której same gałęzie staną się przeszkodą w identyfikacji szukanego liścia, bo będą one przypominały zawiły gąszcz i w konsekwencji niewiele się różniły od liści zgrupowanych na jednej dużej gałęzi. Przykładem takiego niepożądanego przesunięcia balansu na jedną z opisanych stron może być nadmierne powielanie elementów podstawowych w postaci tak zwanych asocjatywnych kopii, co prowadzi do niepotrzebnego generowania zestawów geometrycznych i komplikowania struktury modelu 3D. Temat asocjatywnych kopii autor szerzej opisał w załączonych do niniejszej pracy przemysłeniach i badaniach nad logiczną implementacją asocjatywności do struktury modeli CAD (patrz: Załącznik).

Podsumowując, Modelowanie Poziome należy rozpatrywać w kontekście następujących aspektów:

- optymalna liczba elementów podstawowych i ich optymalne położenie w drzewie struktury modelu 3D,

- optymalna liczba powiązań (asocjatywność) – wszędzie, gdzie jest to uzasadnione, kolejne cechy geometryczne powinny być powiązane z elementami podstawowymi (szkieletowymi),
- brak „zbędnych” powiązań pomiędzy elementami modelu 3D, czyli takich, które nie wynikają z funkcji projektowanego komponentu,
- przejrzystość modelu 3D i łatwość wprowadzania zmian konstrukcyjnych szczególnie takich, które polegają na usunięciu lub dodaniu pewnych cech geometrycznych w jego strukturze [59].

W celu dokładniejszego opisanego wspomnianego na początku tego punktu pożądanego sposobu budowania struktury modelu 3D dla proponowanej metodyki Modelowania Jednoznacznego, jak i przedstawienia swoich przemyśleń na temat technik tworzenia modeli 3D wynikających z wieloletniej praktyki zawodowej, autor przeprowadził szereg badań polegających na budowie kilku wersji topologii tego samego modelu 3D *Komponentu Cienkościennego* w oparciu o technikę Modelowania Poziomego, jak również pozostałe techniki wchodzące w bezpośredni skład Modelowania Jednoznacznego. Badania te miały na celu wykazanie, że logiczna implementacja asocjatywności do struktury modeli CAD pozytywnie wpływa na takie ich aspekty jak: spójność i przejrzystość topologiczna, podatność na wprowadzanie zmian czy powtórne wykorzystanie całej lub części ich geometrii w innych modelach 3D. Przedstawione badania umożliwią także czytelnikowi dokładniejsze zaobserwowanie poruszonego wcześniej braku propagacji zmian, a także pomogą mu zrozumieć, że wzajemna niezależność wybranych rejonów geometrii jest równie istotna jak ich asocjatywność. Ponieważ przemyślenia i badania te nie są główną częścią niniejszej pracy, a stanowią jej dopełnienie pozwalające czytelnikowi spojrzeć na autorską technikę Modelowania Jednoznacznego z szerszej perspektywy, zostały one zawarte w końcowej jej części w formie Załącznika.

#### 3.3.3 Modelowanie Wieloobiektowe (ang. *Multi-Body Modeling*)

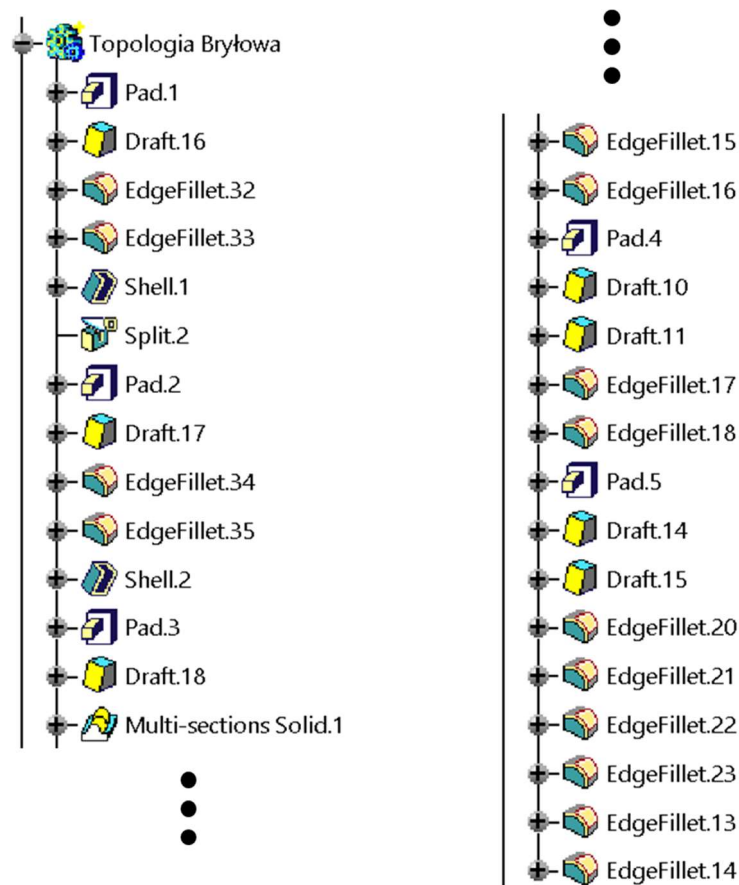
Modelowanie Wieloobiektowe związane jest z Modelowaniem Bryłowym, a w szczególności z zasadami tworzenia modeli typu CSG (ang. *Constructive Solid Geometry*), które zostały opisane w punkcie 3.2.4 Rozdziału 3. Dla przypomnienia, wprowadzenie do systemów CAD Strukturalnych Geometrii Bryłowych oznaczało:

- 1) wykorzystanie algebry Boole’a w technice łączenia poszczególnych przestrzennych prymitywów geometrycznych, a tym samym umożliwienie tworzenia prymitywów użytkownika,
- 2) zastąpienie dotychczasowej unikalności procedur prowadzących do danego rozwiązania w procesie tworzenia modeli 3D dowolnością konstrukcyjną sprawiającą, że droga do owego rozwiązania nie była już tylko jedna,
- 3) hierarchiczną strukturę w postaci drzewa kolejno wykonywanych operacji logicznych oraz stosunkowo zwięzłą formę oznaczającą małe zapotrzebowanie na moc obliczeniową i pamięć komputera.

Mimo, że współczesne systemy CAD generują bardziej zaawansowaną od modeli CSG formę modeli bryłowych, czyli Graniczne Reprezentacje (ang. *Boundary Representations*), to trzy powyższe punkty są nadal istotne przy wykorzystaniu Modelowania Wieloobiektowego. Cechą charakterystyczną współczesnych systemów CAD jest możliwość tworzenia więcej niż jednej bryły, lub inaczej obiektu, w obrębie jednego pliku CAD. Nie chodzi tutaj o tworzenie modelu 3D w postaci złożenia, a więc w postaci zbioru komponentów tworzących dany zespół. W obrębie pliku pojedynczego komponentu użytkownik jest w stanie wygenerować tyle odrębnych brył, ile uzna za stosowne w danej sytuacji. Bryły te należy ze sobą łączyć wykorzystując operacje Boole’owskie i tworząc jednocześnie hierarchiczne drzewo struktury modelu 3D. Z uwagi na brak

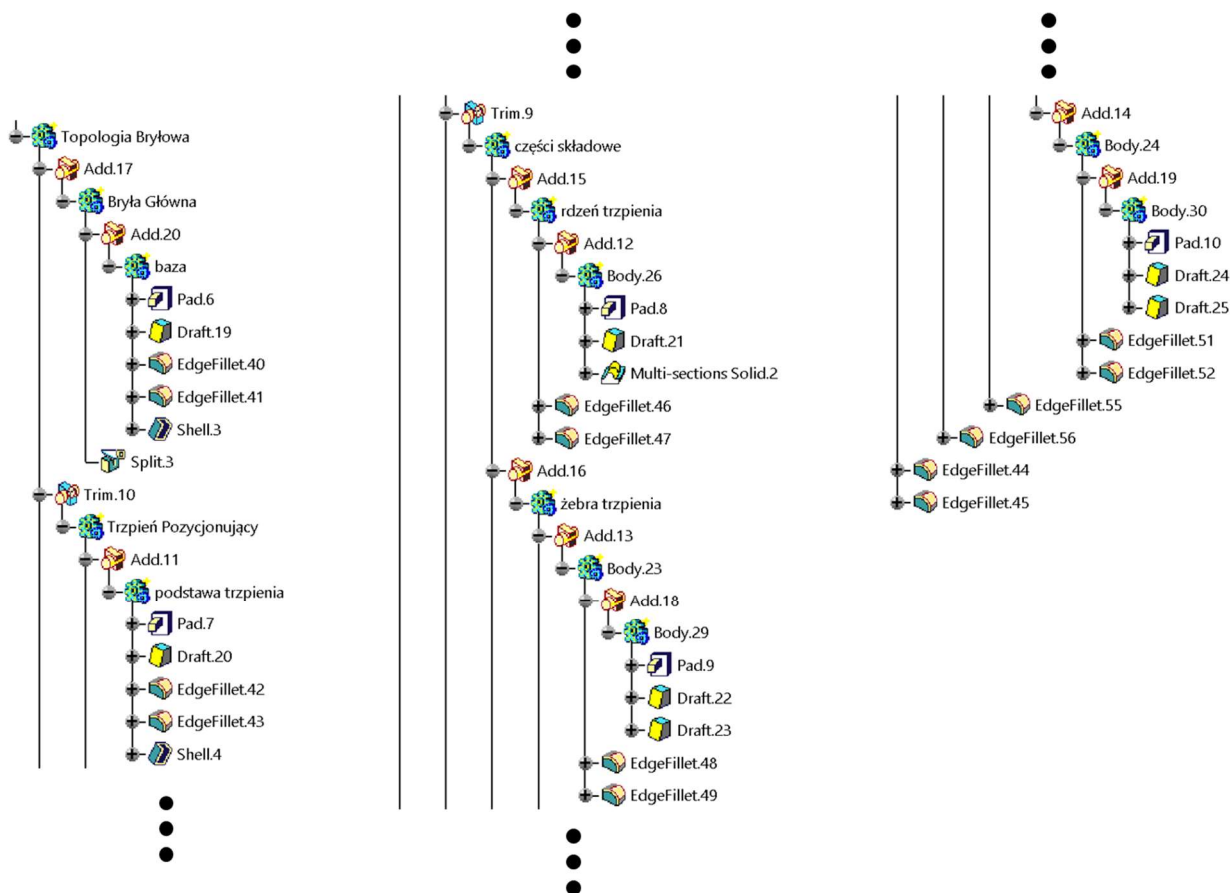
unikalności dla tego działania, to od konstruktora zależy jaką postać przyjmie owo drzewo. Tak jak wspomniano w punkcie 3.2.4 Rozdziału 3 – brak unikalności procedur prowadzących do danego rozwiązania nie oznaczał uwsteczniania się technik tworzenia modeli 3D, a stanowił krok naprzód poprzez wprowadzenie do procesu konstruowania dowolności konstrukcyjnej. Z drugiej strony dowolność jaką dysponuje dziś współczesny konstruktor niesie za sobą dużą odpowiedzialność podczas tworzenia zarówno topologii bryłowej, jak i powierzchniowej. Zatem istnieje ryzyko, że utworzona topologia nie będzie optymalna biorąc pod uwagę przyjęte kryteria wyboru. Narodziła się więc potrzeba ustanowienia pewnych wytycznych podczas łączenia poszczególnych obiektów, a z nią technika je wprowadzająca – Modelowania Wieloobiektowego (ang. *Multi-Body Modeling*).

Systemy CAD wykorzystujące cechy geometryczne umożliwiają generowanie tych cech w obrębie jednej bryły danego komponentu. Topologia bryłowa modelu 3D składa się w takim przypadku z jednego obiektu, w którym zawarte są wszystkie operacje modelowania tworząc tym samym strukturę liniową (rys. 32). Nie ma więc potrzeby stosowania dodatkowych operacji Boole’owskich przy jej tworzeniu. Wprawdzie podczas generowania takiej topologii Algebra Boole’a jest wykorzystywana, jednak wynika to z dodawanych samych cech geometrycznych, które odpowiednie operacje logiczne mają już w sobie zaimplementowane.



Rys. 32. Przykładowa topologia bryłowa modelu 3D utworzona w sposób liniowy

Natomiast w Modelowaniu Wieloobiektowym poszczególne części składowe modelu 3D są pogrupowane w postaci osobnych brył, czyli obiektów, a obiekty te są połączone za pomocą operacji Boole’owskich. Taka topologia jest dłuższa od topologii liniowej i dodatkowo „rozciąga się” w poziomie tworząc tym samym strukturę równoległą (rys. 33).



Rys. 33. Przykładowa topologia bryłowa modelu 3D utworzona w sposób równoległy przy użyciu Modelowania Wieloobiektowego

Przyczyną tej długości i poziomego „rozciągnięcia” jest fakt, że każda część składowa modelu 3D ma postać odrębnej, odpowiednio do jej funkcjonalności nazwanej, bryły głównej, wewnątrz której znajdują się zagnieżdżone bryły pomocnicze zapewniające konstruktorowi dodatkową czytelność strukturalną. Ujawnia się tutaj analogia do drzewa przytoczona w punkcie 3.3.2 Rozdziału 3, według której operacje logiczne jak i dodatkowe obiekty to gałęzie drzewa struktury danego modelu 3D. Takie zagnieżdżanie obiektu w obiekcie ma w porównaniu do struktury liniowej, poza zwiększeniem czytelności drzewa, poprawić jego spójność i stabilność strukturalną podczas przyszłych jego modyfikacji. Łatwiej i szybciej konstruktorowi jest dokonać podmiany całej lokalnej topologii w formie zagnieżdżonego obiektu pomocniczego niż poszczególnych operacji obiektu głównego. Powyższa idea budowania bryłowej topologii modelu 3D łączy się z wcześniej opisaną techniką Modelowania Poziomego. Połączenie to realizowane jest poprzez implementację do tej topologii bryłowych odpowiedników elementów podstawowych pozwalając konstruktorowi na tworzenie integralnej sieci powiązań tego modelu pozbawionej nadmiarowych zależności i stanowiącej spójną i logiczną całość.

Jeśli więc Modelowanie Poziome i Wieloobiektowe pozwalają na tworzenie struktury poziomej, czy też równoległej, to można by założyć, że istnieje też ich wertykalna i zarazem formalna odmiana, prowadząca do utworzenia struktury pionowej, czy też liniowej. Rzeczywiście w dostępnej literaturze można odnaleźć tematykę poświęconą modelowaniu pionowemu w kontekście metodologii tworzenia modeli CAD. Jednak autor sugeruje by do tematyki tej „pochodzić” z ostrożnością i traktować ją jako niepoprawny przykład modelowania. W gruncie rzeczy nie ma w nim sprecyzowanych wytycznych, co często prowadzi do chaotycznego dodawania kolejnych operacji – szeregowo, czyli pionowo – formując tym samym



nieprzemyślane, w odniesieniu do powiązań i struktury, drzewo odzwierciedlające generowany model. Można w tym przypadku stwierdzić, że taka struktura uzyskiwana jest automatycznie przez system CAD – bez świadomej ingerencji konstruktora [51]. Tak wygenerowany model pod względem topologicznym zaczyna bardziej przypominać rzeźbę niż konstrukcję, a przecież tworzy ją, wprawdzie nieświadomie jednak w dalszym ciągu, konstruktor, a nie rzeźbiarz. Dodatkowo, jeśli przyjąć, że:

- termin „metodyka” – to zespół wytycznych dotyczących sposobów postępowania, efektywnych ze względu na określony cel [17],
- termin „metoda” – to określony sposób postępowania; dobór rodzaju działania świadomie stosowany z możliwością powtórzenia go we wszystkich przypadkach danego typu [17],

to zdaniem autora modelowania pionowego nie należy nawet rozpatrywać w takim kontekście. Dlatego też nie znalazło ono miejsca w proponowanym przez niego podziale technik tworzenia modeli 3D (Schemat 1). Autor jeszcze raz zachęca czytelnika do zapoznania się z Załącznikiem do niniejszej pracy, w którym wykazuje on między innymi przewagę topologii równoległej modeli 3D utworzonej dzięki Modelowaniu Wieloobiektowemu nad ich standardową topologią liniową.



## 4 Technika Modelowania Jednoznacznego (ang. *Unambiguous Modeling*)

W rozdziale tym została przedstawiona autorska technika Modelowania Jednoznacznego (ang. *Unambiguous Modeling*) pozwalająca na rozwiązanie problemu dwuznaczności geometrii zorientowanej, na której oparte są współczesne systemy CAD. Autor wyszedł z założenia, że kluczowym aspektem optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD jest odpowiednie przygotowanie danych wejściowych tej struktury. Jeśli bowiem niezamierzona zmiana zwrotu wektora danego elementu wejściowego oznacza zmianę zwrotu wektorów geometrii podrzędnej temu elementowi i ryzyko błędnej interpretacji przez system CAD topologii modelu 3D, to należy wyeliminować wpływ tej zmiany.

Zatem autor sformułował cztery tezy niniejszej rozprawy doktorskiej (patrz: Rozdz. 1), a następnie podjął próbę ich udowodnienia w poniższych badaniach. Aby ułatwić czytelnikowi zrozumienie zasadności badań autora nad proponowaną metodyką tworzenia modeli CAD, w tym jej wytycznych, celowości zastosowania oraz skuteczności działania, podzielił on niniejszy rozdział na następujące punkty:

- 4.1 **Konsekwencje zastosowania geometrii zorientowanej w systemach CAD** – w tym punkcie autor opisał wpływ geometrii zorientowanej na przykładową operację procesu konstruowania w systemie CAD – przycinania powierzchni – i potrzebę eliminacji niezamierzonej formy tego wpływu.
- 4.2 **Wytyczne Modelowania Jednoznacznego – Procedura Jednoznaczności** – w tym punkcie autor zdefiniował pierwszą wytyczną Modelowania Jednoznacznego na przykładzie przygotowania jednoznacznej geometrii w postaci elementu wejściowego dla *Operacji Przycinania* powierzchni. Procedura Jednoznaczności została zilustrowana na rysunkach 67 i 68.
- 4.3 **Wytyczne Modelowania Jednoznacznego – Procedura Neutralności** – w tym punkcie autor zdefiniował drugą wytyczną Modelowania Jednoznacznego kontynuując przykład z punktu 4.2 przygotowania jednoznacznej geometrii w postaci elementu wejściowego dla *Operacji Przycinania* powierzchni. Procedura Neutralności została zilustrowana na rysunku 92.
- 4.4 **Implementacja Modelowania Jednoznacznego do topologii modelu CAD** – w tym punkcie autor przeprowadził szereg badań nad implementacją techniki Modelowania Jednoznacznego do przykładowej topologii modelu 3D – trzpienia pozycjonującego – pokazując tym samym jej pozytywny wpływ na stabilność topologiczną i geometryczną modeli CAD podczas ich transformacji geometrycznych w porównaniu do topologii modeli bez tej implementacji. Celem tych badań było udowodnienie Tezy 1 i Tezy 2 niniejszej rozprawy. Wyniki poszczególnych transformacji ujęto w formie Tabel 3 – 8 zamieszczonych w Rozdziale 5.
- 4.5 **Implementacja Modelowania Jednoznacznego do badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD** – w tym punkcie autor odniósł się do pracy doktorskiej Gerharda Tecklenburga będącego obecnie profesorem na Uniwersytecie HAW w Hamburgu [56], której tematem jest wykorzystanie Parametrycznego Asocjatywnego Projektowania PAD (ang. *Parametric Associative Design*) w procesie projektowo-konstrukcyjnym gałęzi przemysłu motoryzacyjnego. Zawarte w pracy G. Tecklenburga badania nad efektywnością technik tworzenia modeli 3D posłużyły autorowi do wykazania, że

implementacja Modelowania Jednoznacznego do tych technik wyrównuje ich skuteczność i niweluje przedstawione w wynikach badań różnice wynikające ze stabilności tworzonych dzięki nim topologii modeli 3D. Tym samym autor zaproponował zmianę tych wyników biorąc pod uwagę implementację Modelowania Jednoznacznego. Celem tych badań było udowodnienie Tezy 3 i Tezy 4 niniejszej rozprawy, a ich wyniki ujęto w formie Tabel 9 – 11 zamieszczonych w Rozdziale 5.

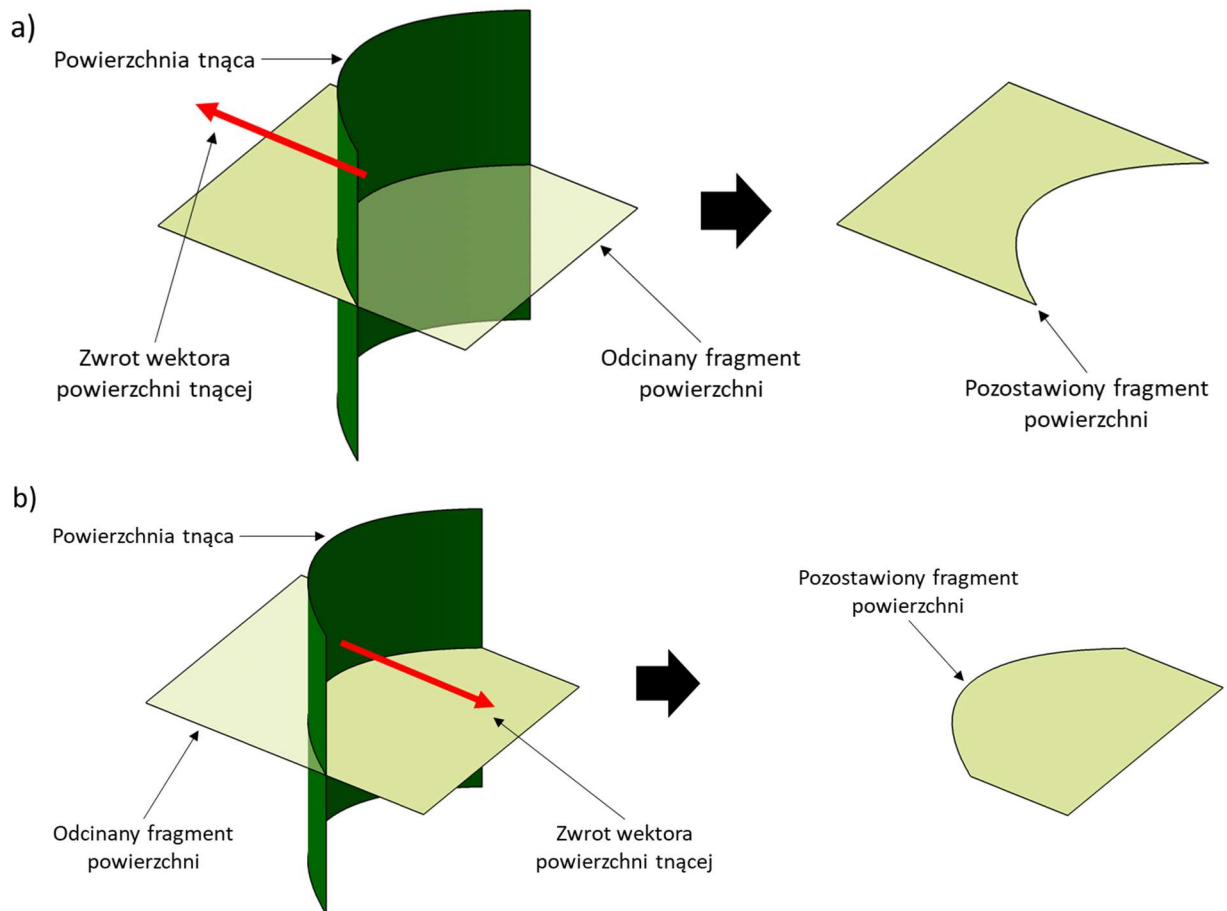
Poruszone zagadnienia są jednocześnie zwieńczeniem zaprezentowanych w niniejszej rozprawie doktorskiej technik modelowania i badań z nimi związanych zawartych w Rozdziale 4, jak i w Załączniku, a tym samym końcowym etapem tytułowej metodyki optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD. Nie oznacza to jednak końcowego etapu tej optymalizacji w kontekście ogólnym. Według zaproponowanego przez autora w punkcie 3.1 Rozdziału 3 podziału technik tworzenia modeli 3D (Schemat 1), Modelowanie Jednoznacznego jest tylko „przystankiem” na drodze do dalszego rozwoju tych technik. Autor niniejszą pracą, a zwłaszcza niniejszym rozdziałem, chce zwrócić uwagę kadry inżynierskiej, jak i środowiska naukowego na możliwość przyspieszenia realizacji procesu projektowo-konstrukcyjnego samą metodyką tworzenia wirtualnych odpowiedników przyszłych wytworów oraz na wpływ Modelowania Jednoznacznego na tę możliwość. Fundamentalny charakter tej techniki, a więc jej uniwersalność sprawia, że w opinii autora warto przynajmniej rozważyć jej implementację do praktyki inżynierskiej.

#### **4.1 Konsekwencje zastosowania geometrii zorientowanej w systemach CAD**

Matematyczny opis modeli 3D tworzonych we współczesnych systemach CAD opiera się o założenia przedstawione w punkcie 3.2.4 Rozdziału 3 dotyczącym Modelowania Bryłowego charakteryzujące Graniczne Reprezentacje (ang. *Boundary Representations – B-Rep*). Co ciekawe, założenia te dotyczą zarówno modeli bryłowych, jak również częściowo – powierzchniowych. Dla przypomnienia, definiowanie zewnętrznej geometrii Granicznych Reprezentacji odbywa się przy użyciu Twierdzenia Eulera, podczas gdy identyfikacja ich wnętrza realizowana jest w oparciu o wzór Gaussa-Ostrogradskiego umożliwiający zamianę całki powierzchniowej zorientowanej na całkę potrójną (objętościową) [17]. Takie rozwiązanie implikuje zastosowanie w systemach CAD opisanej w tym samym rozdziale geometrii zorientowanej. Dla końcowego odbiorcy, czyli użytkownika danego systemu CAD, oznacza to dwie rzeczy:

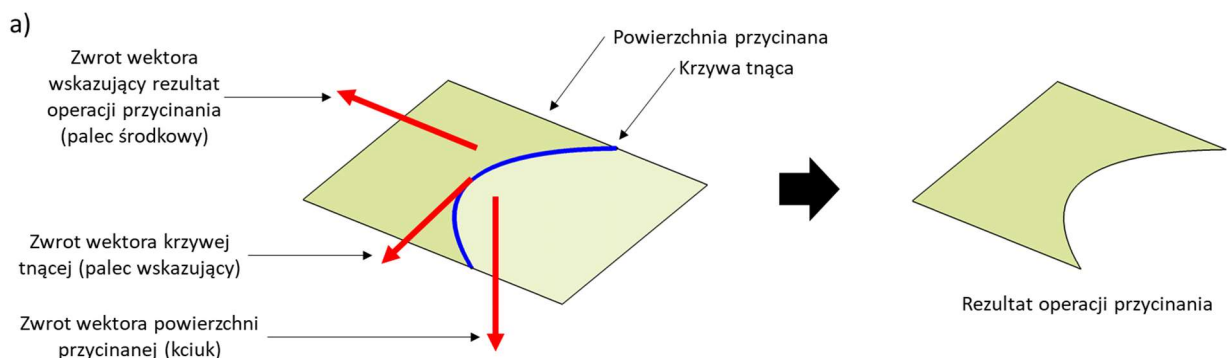
- 1) zwiększenie dowolności konstrukcyjnej – tak jak wprowadzenie do projektowania inżynierskiego modeli typu CSG (ang. *Constructive Solid Geometry*) opisanych w punkcie 3.2.4 Rozdziału 3 oznaczało eliminację dotychczasowej unikalności procedur prowadzących do realizacji celu projektowego i danie konstruktorowi możliwości wyboru w jego osiągnięciu, tak implementacja geometrii zorientowanej pozwoliła te możliwości jeszcze bardziej poszerzyć. W konsekwencji konstruktor wykorzystując fakt, że prawie każda geometria generowana w systemie CAD posiada swój wektor o określonym kierunku i zwrocie, jest w stanie sprecyzować sposób w jaki system CAD ma interpretować wykonywane na niej operacje. Przykładowo:
  - konstruktor poprzez narzędzie programowe umożliwiające przycinanie geometrii może określić którą część danej powierzchni odciąć za pomocą innej powierzchni. W domyślnym ustawieniu narzędzia programowego system pozostawia po odcięciu tę część powierzchni przycinanej, którą wskazuje orientacja powierzchni tnącej (rys. 34a) [63]. Poprzez zmianę tej orientacji, czyli poprzez zmianę zwrotu wektora powierzchni

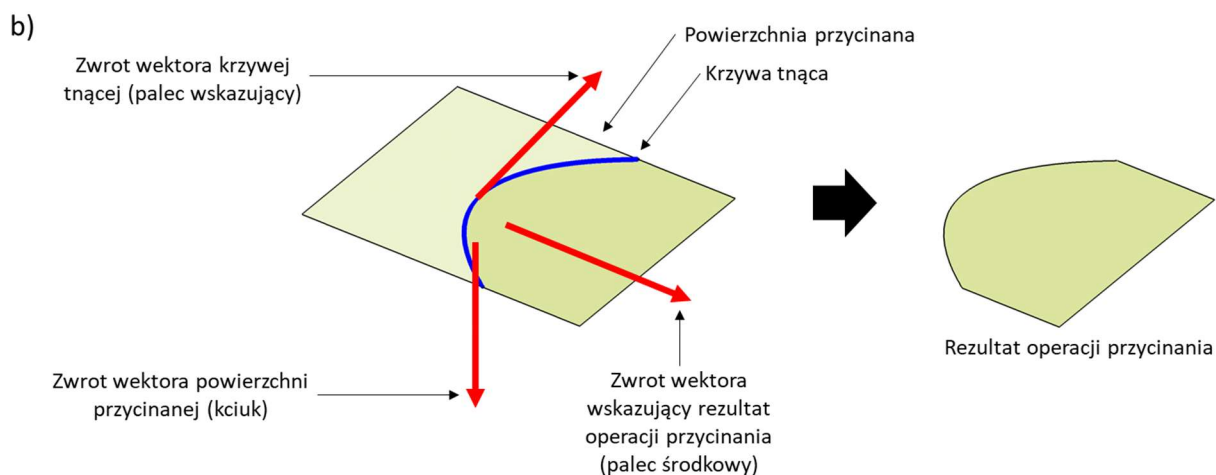
tnącej, konstruktor może odwrócić pierwotny rezultat pozostawiając odcinany wcześniej fragment (rys. 34b).



Rys. 34. Wpływ zmiany orientacji powierzchni tnącej na pozostawiony fragment powierzchni w operacji jej przycinania: a) zwrot wektora definiujący pozostawiony fragment na lewo od powierzchni tnącej, b) zwrot wektora definiujący pozostawiony fragment na prawo od powierzchni tnącej

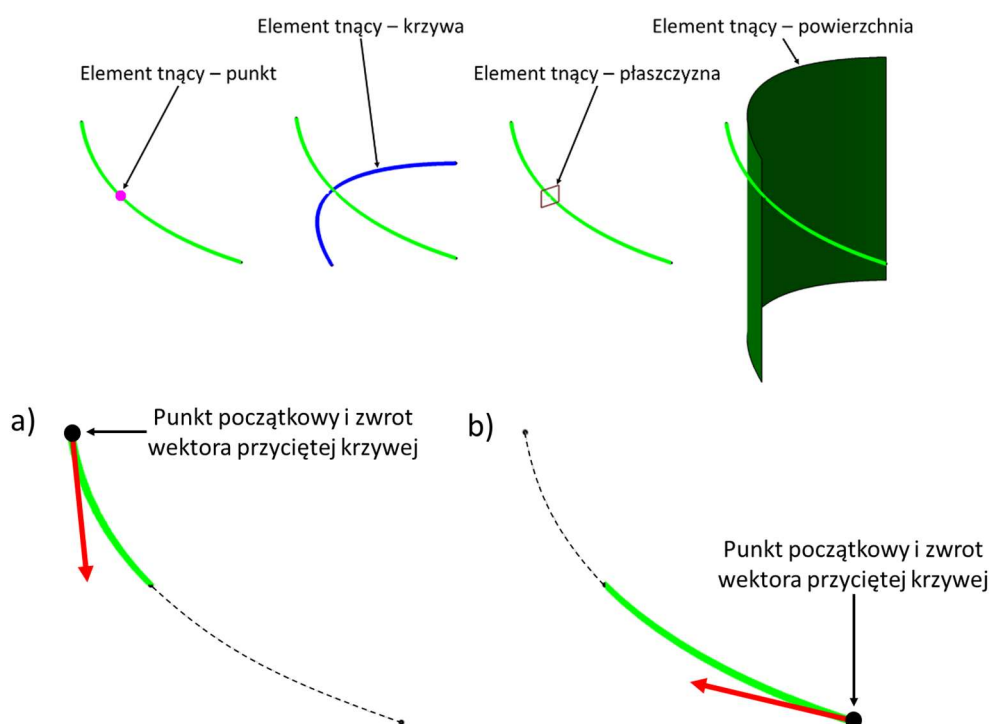
- konstruktor poprzez narzędzie programowe umożliwiające przycinanie geometrii może określić, którą część danej powierzchni odciąć za pomocą krzywej. W domyślnym ustawieniu narzędzia programowego system pozostawia po odcięciu tę część powierzchni przycinanej, którą określa reguła prawej dłoni (rys. 35a) [63]. Poprzez zmianę zwrotu wektora krzywej tnącej, a tym samym zmianę zwrotów osi układu współrzędnych definiującego regułę prawej dłoni, konstruktor może odwrócić pierwotny rezultat pozostawiając odcinany wcześniej fragment (rys. 35b).





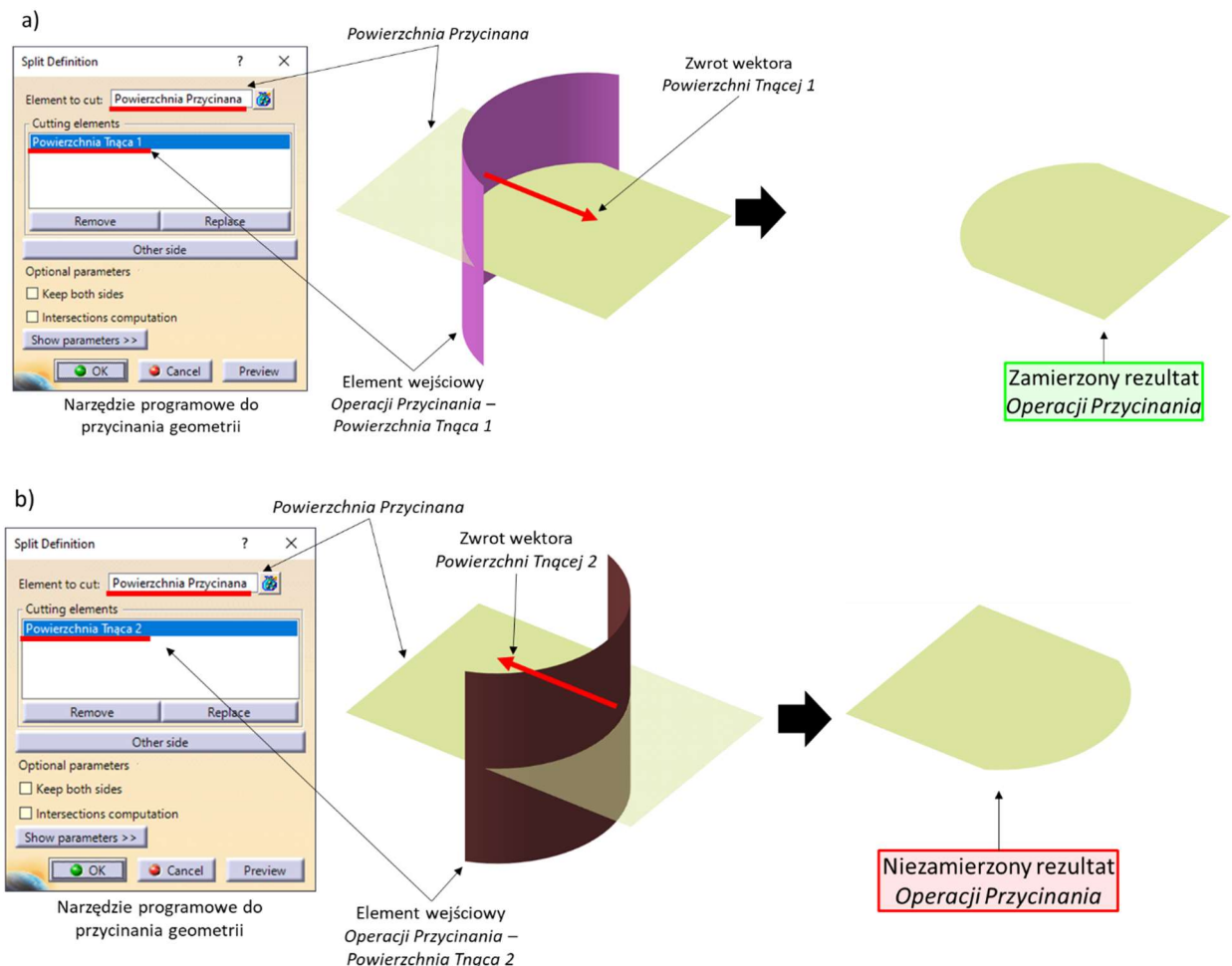
Rys. 35. Operacja przycinania powierzchni krzywą tnącą określona regułą prawej dłoni: a) rezultat domyślnego ustawienia narzędzia programowego do przycinania geometrii, b) wpływ zmiany zwrotu wektora krzywej tnącej na rezultat operacji przycinania

- konstruktor poprzez narzędzie programowe umożliwiające przycinanie geometrii może określić, którą część danej krzywej odciąć za pomocą elementu tnącego w postaci punktu, innej krzywej, płaszczyzny konstrukcyjnej lub powierzchni. W domyślnym ustawieniu narzędzia programowego system pozostawia po odcięciu tę część krzywej, na której leży jej punkt początkowy (rys. 36a) [63]. Poprzez zmianę zwrotu wektora krzywej przycinanej, a tym samym zmianę położenia jej punktu początkowego, konstruktor może odwrócić pierwotny rezultat pozostawiając odcinany wcześniej fragment (rys. 36b).



Rys. 36. Operacja przycinania krzywej przy użyciu elementu tnącego w postaci: punktu, krzywej, płaszczyzny, powierzchni: a) rezultat domyślnego ustawienia narzędzia programowego do przycinania geometrii, b) wpływ zmiany zwrotu wektora krzywej przycinanej na rezultat operacji przycinania

2) wprowadzenie do generowanej geometrii dwuznaczności, czy też niejednoznaczności, której poniekąd konsekwencją jest zwiększenie opisanego w punkcie pierwszym dowolności konstrukcyjnej i która wynika z posiadanego przez tę geometrię wektora o określonym kierunku i zwrocie – powyższe operacje modelowania będą spełniały kryteria wyboru konstruktora tylko do momentu, gdy orientacja ich elementów wejściowych zmieni się w sposób niezamierzony przez konstruktora – na przeciwną w stosunku do początkowego ich zdefiniowania. Taka sytuacja może wystąpić podczas podmiiany elementów wejściowych i jest ona dla konstruktora niepożądana. Rysunek 37 przedstawia *Operację Przciniania* powierzchni jej elementem wejściowym w postaci *Powierzchni Tnącej 1* o określonym zwrocie wektora (rys. 37a) oraz niezamierzony przez konstruktora wpływ podmiiany tego elementu na uzyskiwany rezultat (rys. 37b). Podmieniany element wejściowy w postaci *Powierzchni Tnącej 2* posiada przeciwną orientację, zatem interpretacja takiej operacji przez system CAD jest również przeciwna w porównaniu do pierwotnej.



Rys. 37. *Operacja Przciniania* powierzchni jej elementem wejściowym: a) *Powierzchnią Tnącą 1*, której użycie powoduje zamierzony przez konstruktora rezultat, b) *Powierzchnią Tnącą 2*, której użycie powoduje niezamierzony przez konstruktora rezultat wynikający ze zmienionego jej zwrotu wektora

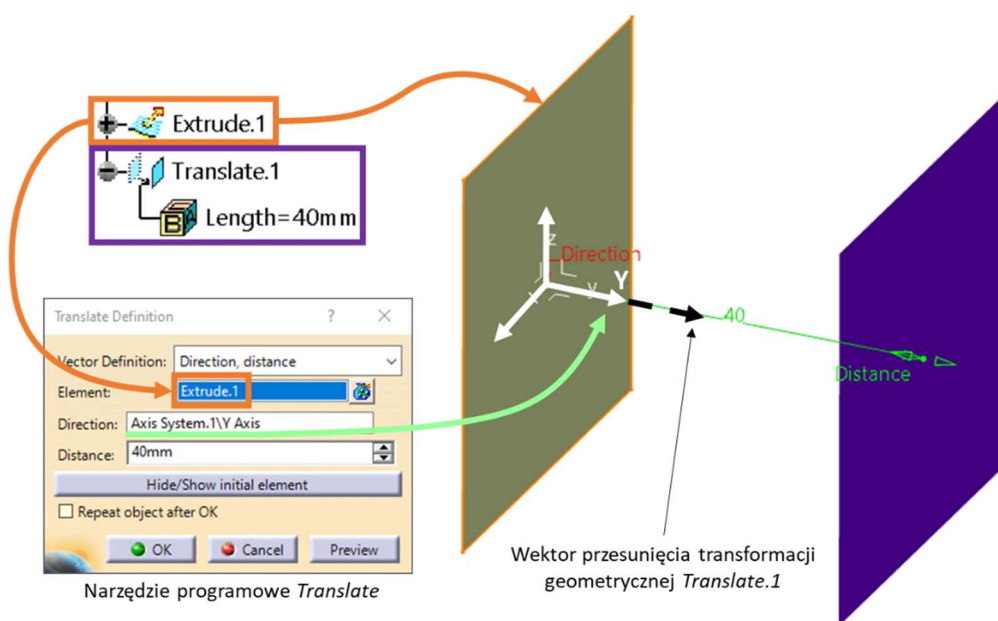
Jak zatem wyeliminować dwuznaczność geometrii zorientowanej pozostawiając jednocześnie pozytywne konsekwencje wynikające z możliwości świadomego definiowania zwrotu wektora tej geometrii? Logicznym rozwiązaniem byłoby wprowadzenie do topologii modelu takiej procedury

konstrukcyjnej, która będzie umożliwiała konstruktorowi świadomy i kontrolowany wybór interpretacji działania poszczególnych operacji modelowania tej topologii przez system CAD, niezależnie od losowej zmiany orientacji elementów wejściowych dla tych operacji. Autor zdefiniował więc dwie uniwersalne procedury: **Procedurę Jednoznaczności** i **Procedurę Neutralności**, które tym samym stały się wytycznymi Modelowania Jednoznacznego.

#### 4.2 Wytyczne Modelowania Jednoznacznego – Procedura Jednoznaczności

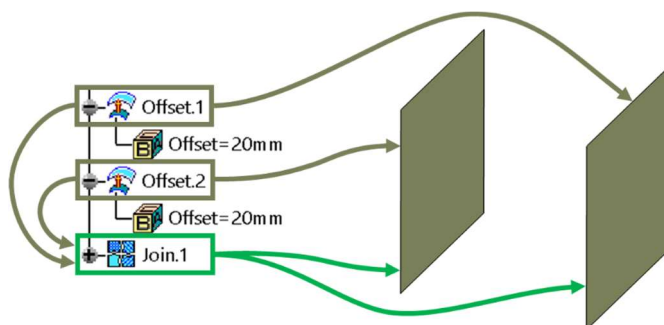
Przed opisaniem pierwszej z dwóch wytycznych Modelowania Jednoznacznego – Procedury Jednoznaczności, autor poniżej przedstawia pięć głównych narzędzi programowych systemu CAD wykorzystanych w tej procedurze:

- 1) Tworzenie przesunięcia wybranej geometrii o dany wektor – w systemie CATIA V5 narzędzie programowe *Translate* (rys. 38). Wektor przesunięcia może być zdefiniowany linią prostą, osią lub dwoma punktami.



Rys. 38. Tworzenie przesunięcia *Translate.1* wzdłuż wskazanego kierunku – osi Y lokalnego układu współrzędnych, przy użyciu narzędzia programowego *Translate*

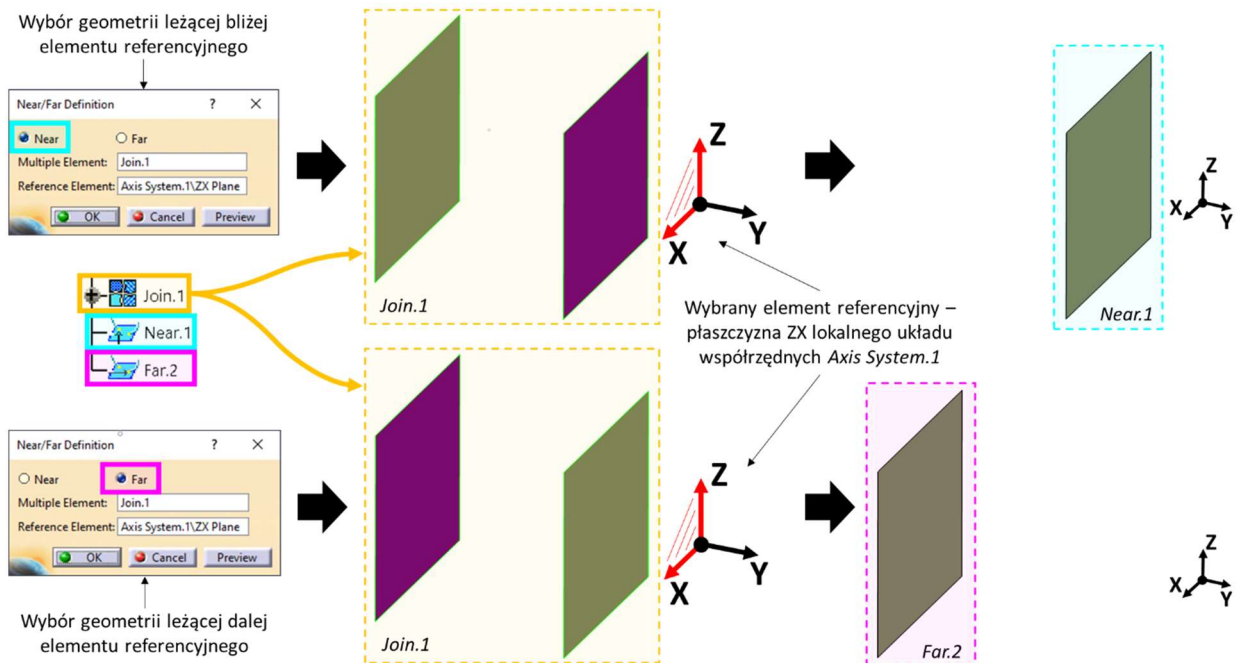
- 2) Programowe połączenie geometrii (w systemie CATIA V5 narzędzie programowe *Join*) – w opisywanej procedurze wykorzystywane w logicznej jego formie, umożliwiające utworzenie grupy geometrii nie mających ze sobą rejonów wspólnych, a tym samym reprezentację tych geometrii w drzewie struktury modelu w postaci jednej operacji modelowania (rys. 39).



Rys. 39. Programowe połączenie geometrii przy użyciu narzędzia programowego *Join*

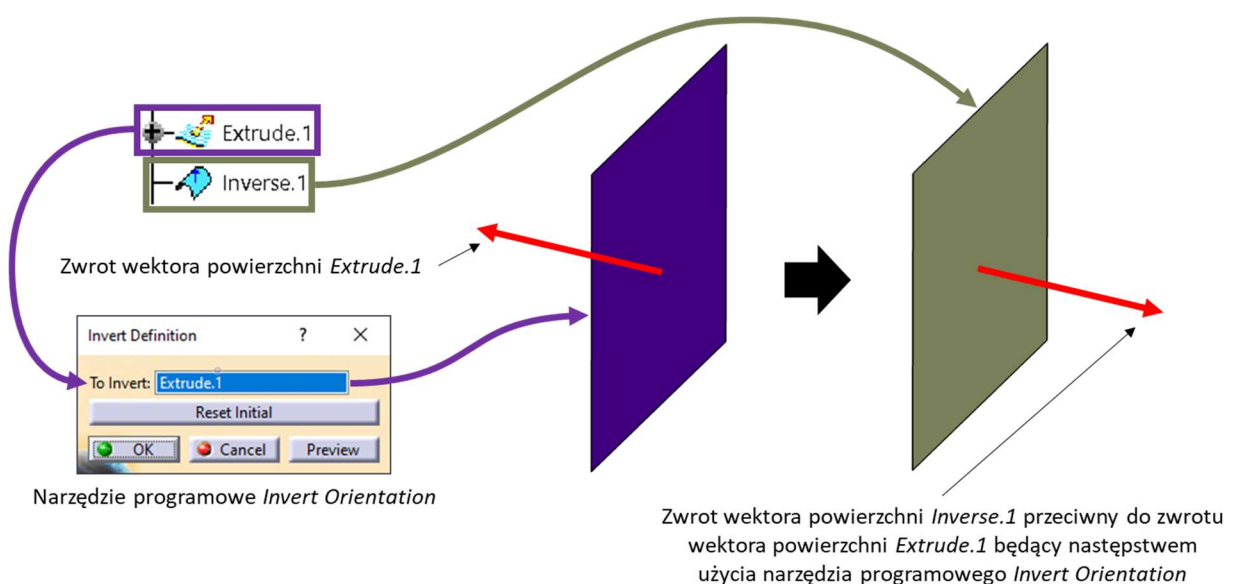


- 3) Automatyczny wybór geometrii przez system CAD uzależniony od jej położenia w stosunku do innej geometrii (w systemie CATIA V5 narzędzie programowe *Near/Far*) – umożliwia wybranie spośród grupy logicznie połączonej geometrii elementu leżącego bliżej lub dalej wybranego elementu referencyjnego. Niezależnie od zmiany geometrii w wybranej grupie system zawsze będzie dokonywał wyboru elementu spełniającego zdefiniowany przez konstruktora warunek początkowy (rys. 40).



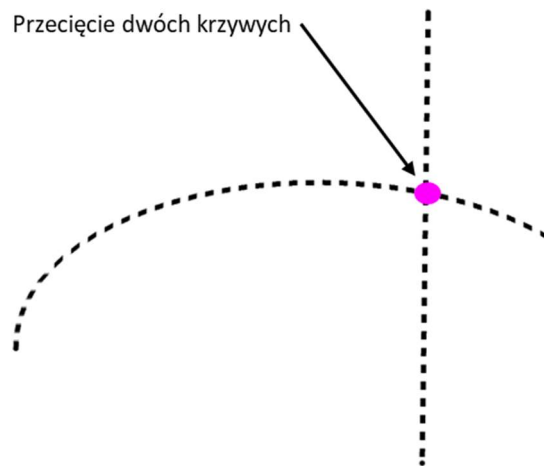
Rys. 40. Automatyczny wybór powierzchni przez system CAD spośród grupy logicznie połączonej geometrii leżącej bliżej lub dalej wybranego elementu referencyjnego przy użyciu narzędzia programowego *Near/Far*

- 4) Zmiana zwrotu wektora wybranej geometrii – w systemie CATIA V5 narzędzie programowe *Invert Orientation* (rys. 41).



Rys. 41. Zmiana zwrotu wektora powierzchni *Extrude.1* poprzez utworzenie powierzchni *Inverse.1* przy użyciu narzędzia programowego *Invert Orientation*

- 5) Definiowanie punktów przecięcia krzywych, krzywych przecięcia bryły z powierzchnią lub dwóch powierzchni [62] – w systemie CATIA V5 narzędzie programowe *Intersection* (rys. 42).



Rys. 42. Punkt przecięcia dwóch krzywych będący rezultatem zastosowania narzędzia programowego *Intersection*

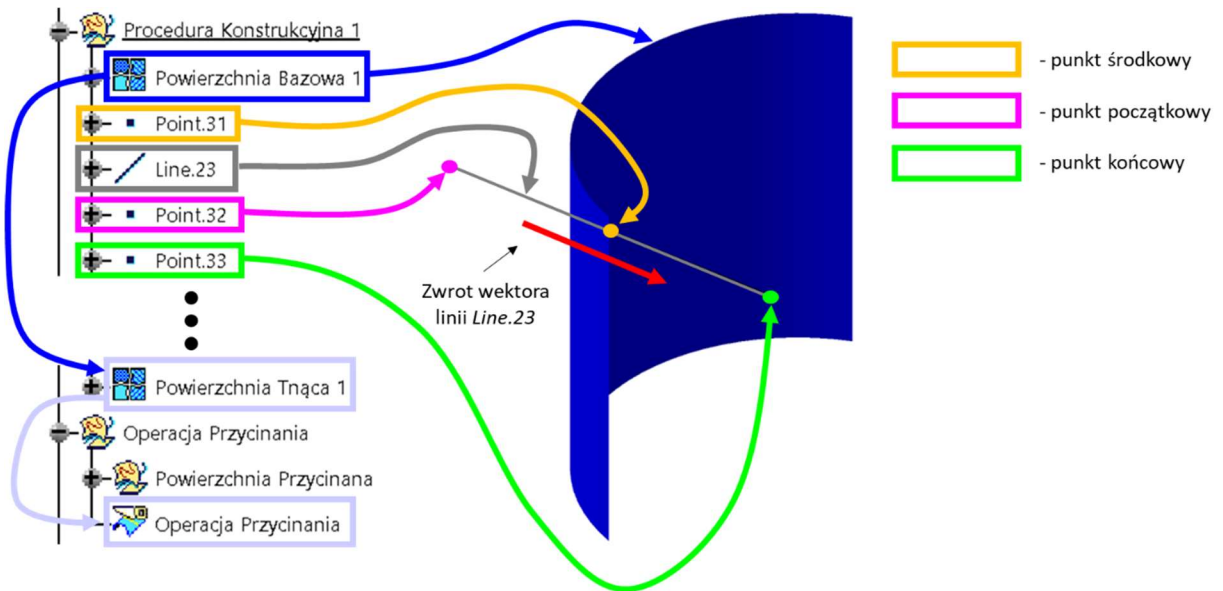
Oprócz powyższych narzędzi programowych wykorzystane zostały prymitywy geometryczne w postaci punktów i linii prostych – w systemie CATIA V5 narzędzia programowe *Point* i *Line*.

Implementacja Modelowania Jednoznacznego polega na dodaniu do topologii modelu 3D określonych procedur konstrukcyjnych zapewniających kontrolę nad daną operacją modelowania niezależnie od potencjalnie losowej zmiany zwrotów wektorów elementów wejściowych dla tej operacji. Wracając zatem do przykładowej *Operacji Przycinania* zilustrowanej na rysunku 37, aby wyeliminować generowanie losowości powierzchni tnącej należałoby do jej zdefiniowania zastosować taką procedurę, która w konsekwencji zapewni pełną kontrolę nad *Operacją Przycinania* niezależnie od orientacji tej powierzchni. Taka procedura konstrukcyjna przed implementacją wytycznych Modelowania Jednoznacznego mogłaby składać się z kilku kroków i wyglądać następująco:

#### **Procedura Konstrukcyjna 1**

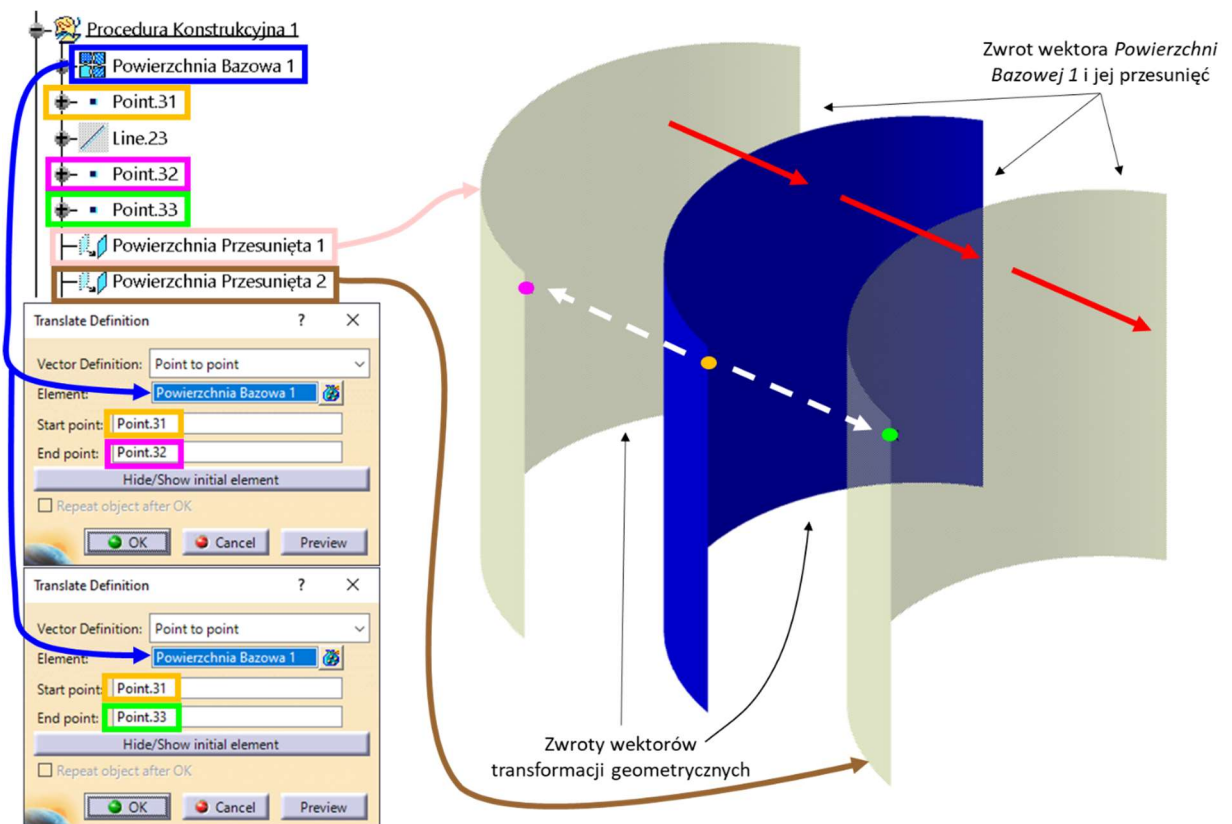
##### **Krok 1:**

- a) Utworzenie punktu środkowego *Point.31 Powierzchni Bazowej 1* będącej geometrią nadrzędną dla elementu wejściowego *Operacji Przycinania – Powierzchni Tnącej 1*.
- b) Utworzenie linii *Line.23* normalnej do *Powierzchni Bazowej 1* na dowolną długość w taki sposób, aby jej środek przechodził przez punkt *Point.31*.
- c) Utworzenie dwóch punktów *Point.32* i *Point.33* na początku i na końcu linii *Line.23* (rys. 43).



Rys. 43. Utworzenie punktu środkowego *Point.31* i linii normalnej *Line.23* *Powierzchni Bazowej 1* oraz punktu początkowego *Point.32* i punktu końcowego *Point.33* tej linii

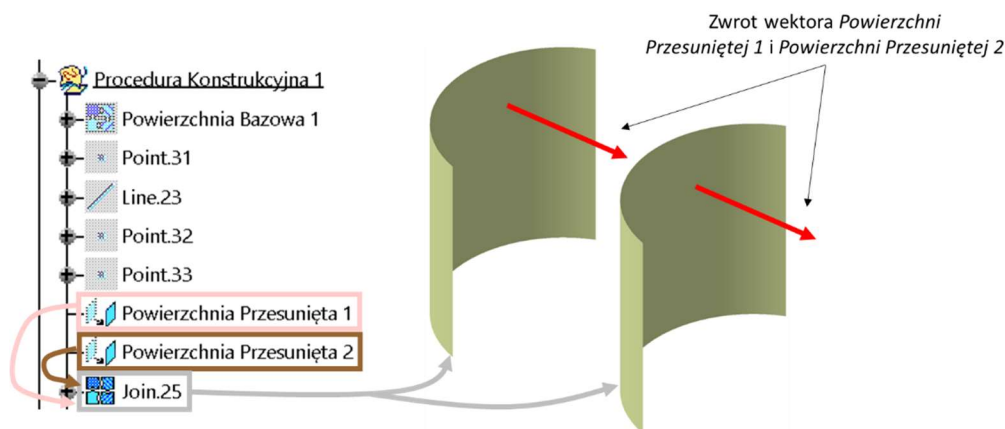
- d) Utworzenie dwóch przesunięć *Powierzchni Bazowej 1* w taki sposób, aby wektory tych transformacji geometrycznych miały swój początek w punkcie środkowym *Point.31* tej powierzchni, a koniec odpowiednio w punkcie *Point.32* i *Point.33*. Utworzone w ten sposób *Powierzchnia Przesunięta 1* i *Powierzchnia Przesunięta 2* posiadają taki sam zwrot wektora jak *Powierzchni Bazowej 1* (rys. 44).



Rys. 44. Utworzenie *Powierzchni Przesuniętej 1* i *Powierzchni Przesuniętej 2* przy użyciu narzędzia programowego *Translate*

**Krok 2:**

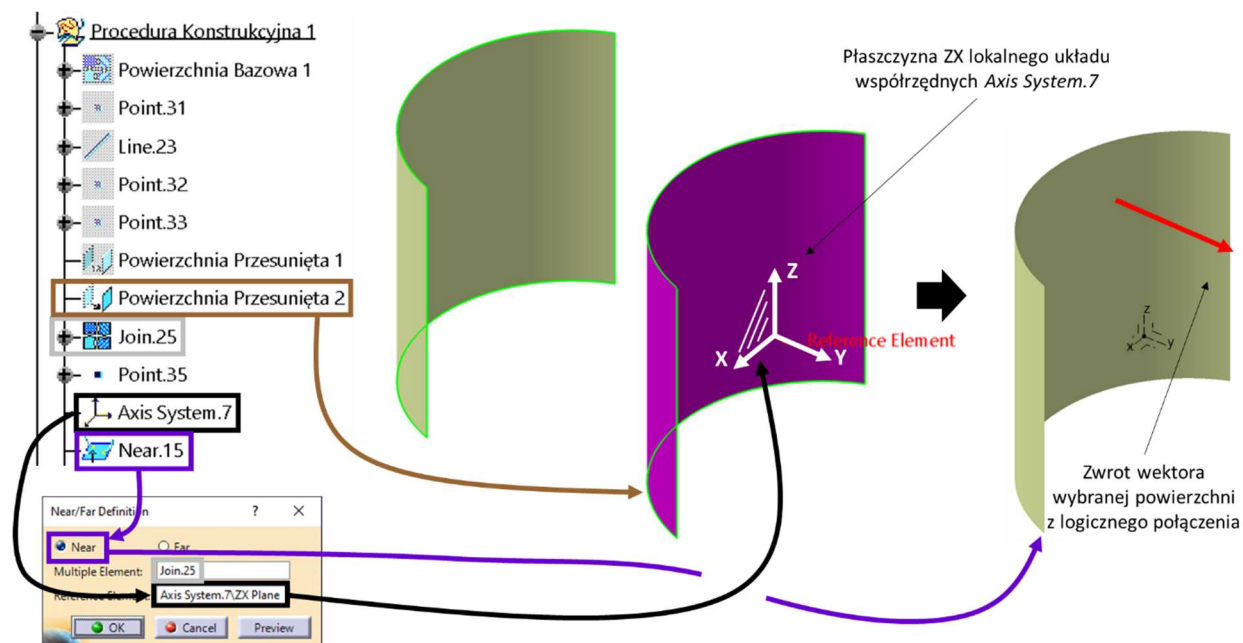
Logiczne połączenie *Powierzchni Przesuniętej 1* i *Powierzchni Przesuniętej 2*. Połączone powierzchnie są reprezentowane w drzewie struktury modelu 3D w postaci jednej operacji *Join.25*. Ich orientacja nie ulega zmianie (rys. 45).



Rys. 45. Utworzenie logicznego połączenia *Join.25* z operacji *Powierzchnia Przesunięta 1* i *Powierzchnia Przesunięta 2* przy użyciu narzędzia programowego *Join*

**Krok 3:**

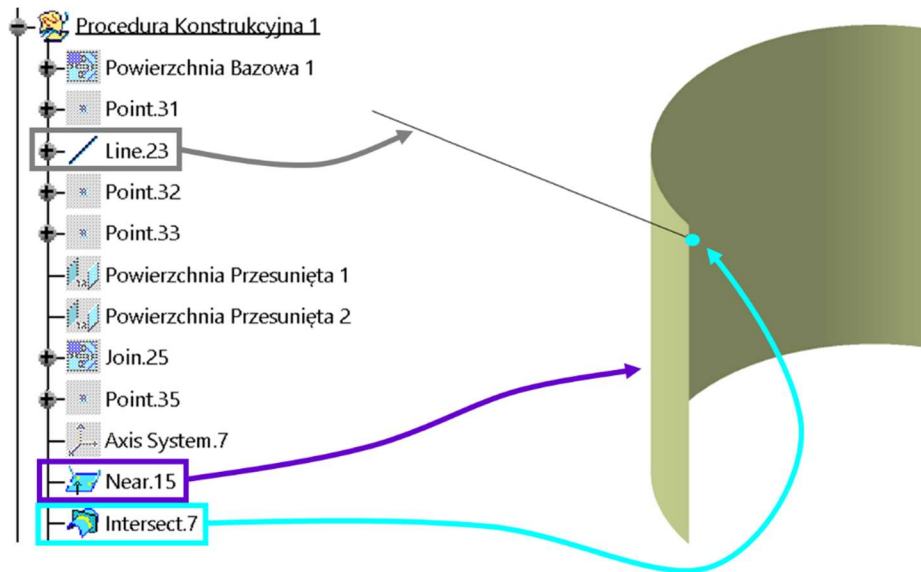
Zastosowanie narzędzia programowego *Near/Far* pozwalającego na automatyczny wybór przez system CAD spośród grupy logicznie połączonej geometrii elementu leżącego bliżej lub dalej wybranego elementu referencyjnego. W tym przypadku autor definiuje poszczególne atrybuty tego narzędzia w taki sposób, aby system CAD dokonywał wyboru powierzchni położonej bliżej płaszczyzny ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*. W rezultacie pozostaje jedna powierzchnia (*Powierzchnia Przesunięta 2*) reprezentowana w drzewie struktury modelu 3D przez operację *Near.15* umożliwiającą wykonanie ostatniego kroku tej procedury konstrukcyjnej. Jej orientacja nie ulega zmianie (rys. 46).



Rys. 46. Utworzenie operacji *Near.15* reprezentującej geometrię leżącą bliżej płaszczyzny ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* przy użyciu narzędzia programowego *Near/Far*

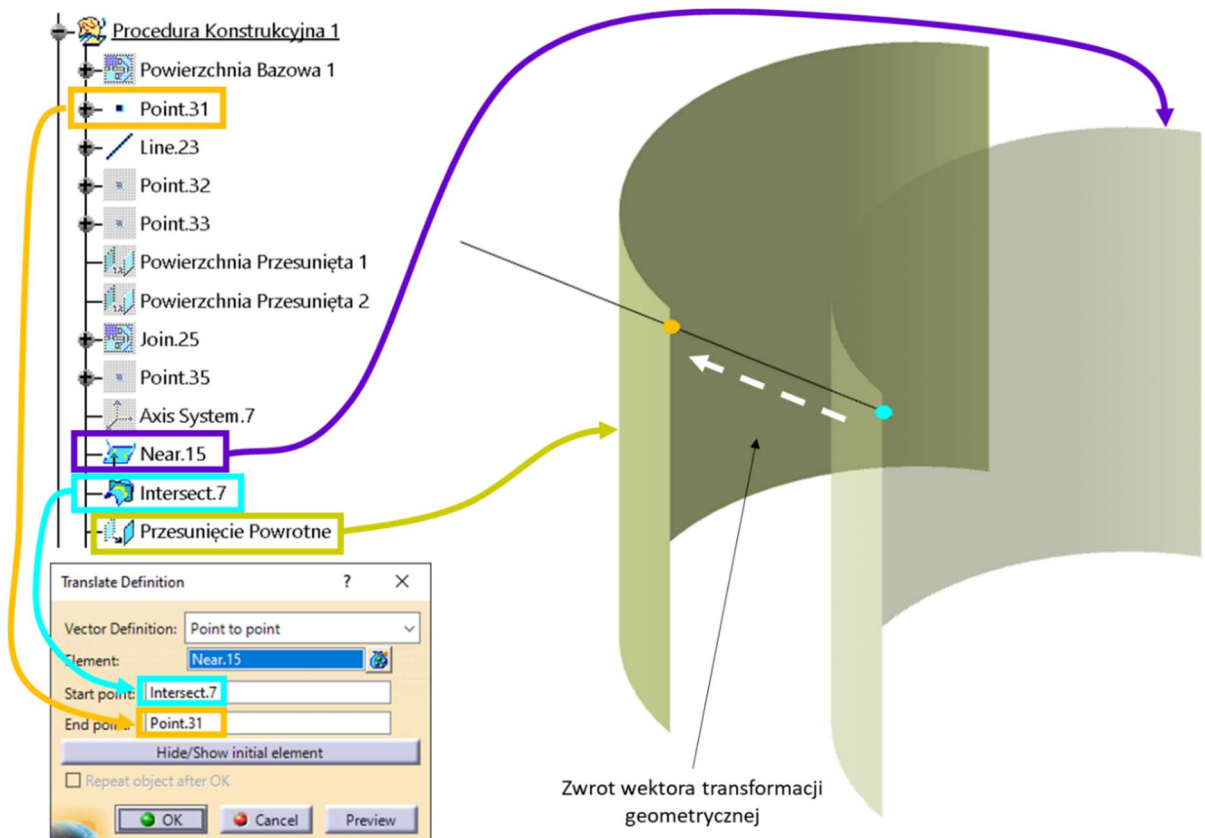
**Krok 4:**

- a) Utworzenie przecięcia *Intersect.7* wybranej w **Kroku 3** powierzchni *Near.15* z linią *Line.23* (rys. 47).



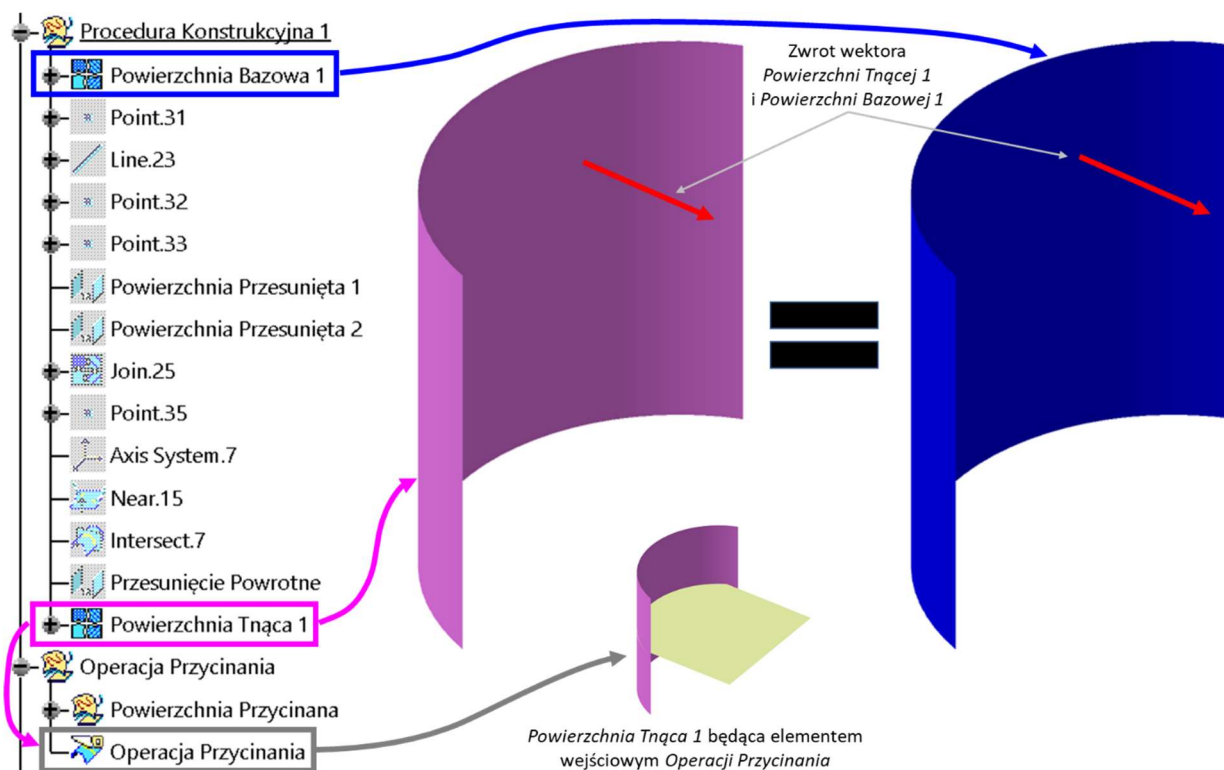
Rys. 47. Utworzenie przecięcia w postaci punktu *Intersect.7* przy użyciu narzędzia programowego *Intersection*

- b) Utworzenie przesunięcia wybranej w **Kroku 3** powierzchni *Near.15* w taki sposób, aby wektor tej transformacji geometrycznej miał swój początek w przecięciu *Intersect.7*, a koniec w punkcie środkowym *Point.31* Powierzchni Bazowej 1. Utworzone w ten sposób *Przesunięcie Powrotne* jest więc równe połowie długości linii *Line.23* (rys. 48).

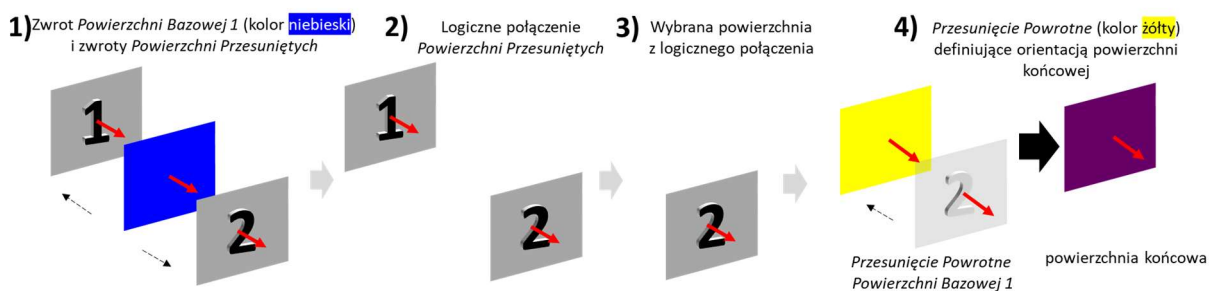


Rys. 48. Utworzenie *Przesunięcia Powrotnego* przy użyciu narzędzia programowego *Translate*

Efektom powyższej procedury konstrukcyjnej, przedstawionej w uogólniony sposób również na rysunku 50, jest powierzchnia końcowa mająca taki sam kształt, pozycję i zwrot wektora jak *Powierzchnia Bazowa 1*. W opisywanym przykładzie powierzchnią końcową jest *Powierzchnia Tnąca 1* będąca elementem wejściowym *Operacji Przyniania* przedstawionej na rysunku 37a (rys. 49).

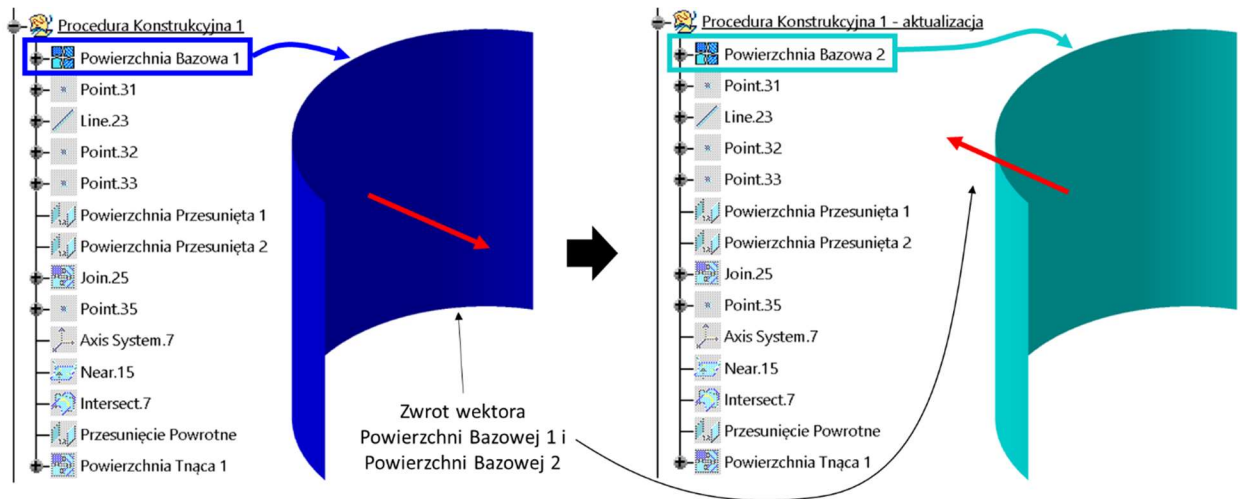


Rys. 49. Rezultat Procedury Konstrukcyjnej 1 – powierzchnia końcowa w postaci *Powierzchni Tnącej 1* mająca taki sam kształt, pozycję i zwrot wektora jak *Powierzchnia Bazowa 1*



Rys. 50. Cztery Kroki Procedury Konstrukcyjnej 1

Niestety taka procedura konstrukcyjna nie jest pozbawiona dwuznaczności geometrycznej. Aby to potwierdzić autor podmienia w niej *Powierzchnię Bazową 1* *Powierzchnią Bazową 2* posiadającą tę samą lokalizację w przestrzeni i postać geometryczną, lecz przeciwny zwrot wektora (rys. 51).



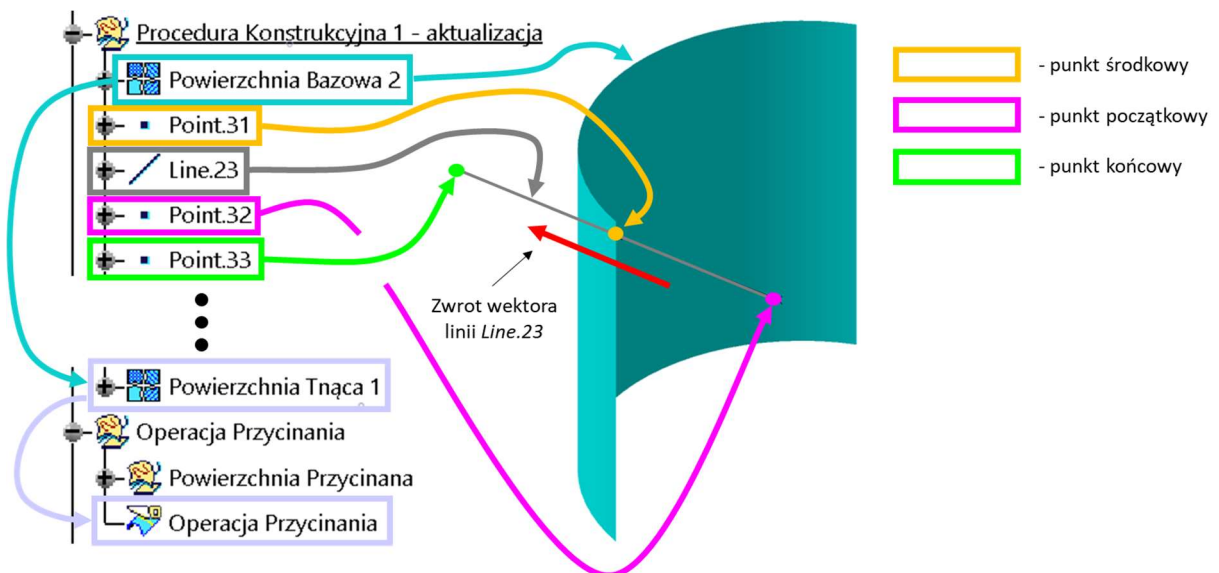
Rys. 51. Procedura Konstrukcyjna 1 z zaimplementowaną *Powierzchnią Bazową 1* (po lewej) i jej uaktualniona wersja z zaimplementowaną *Powierzchnią Bazową 2* (po prawej)

Po zaktualizowaniu Procedura Konstrukcyjna 1 prezentuje się w następujący sposób:

### Procedura Konstrukcyjna 1 – aktualizacja

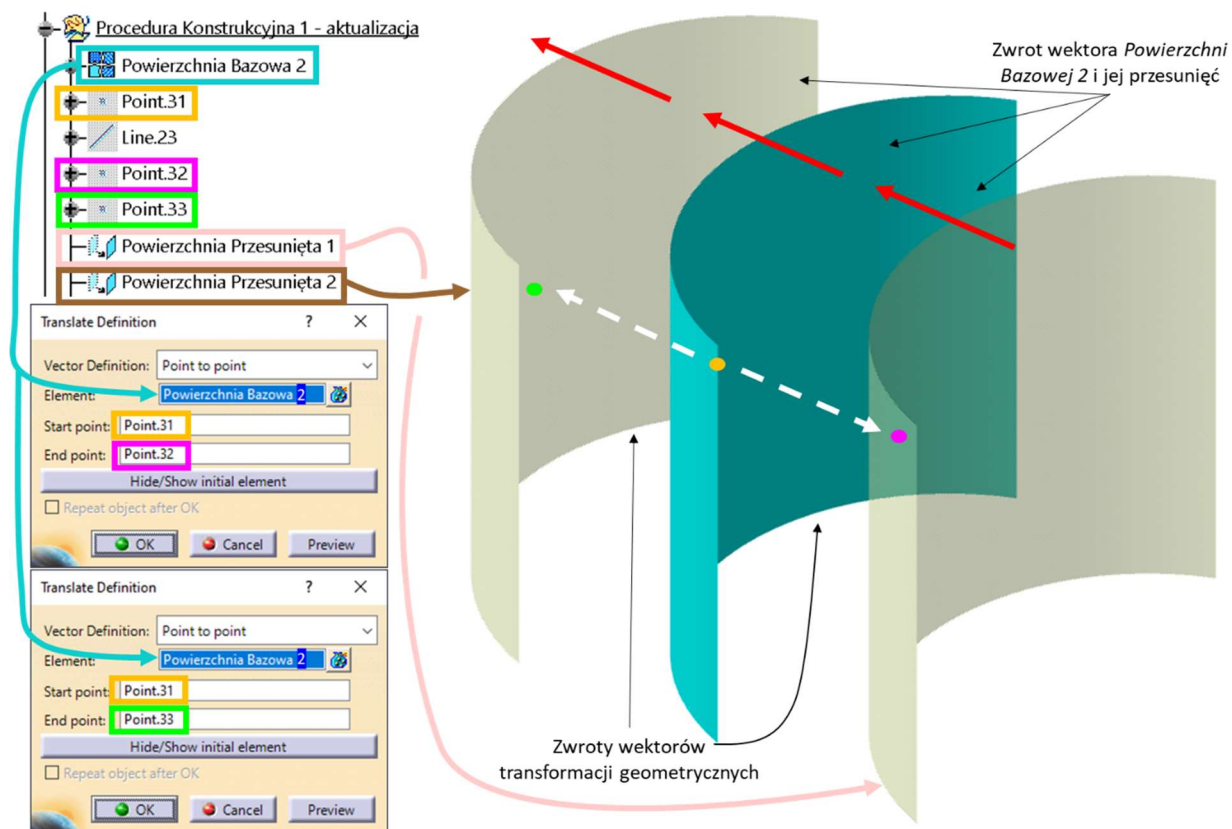
#### Krok 1:

- Punkt *Point.31* jest teraz punktem środkowym *Powierzchni Bazowej 2*, która staje się geometrią nadrzędną dla elementu wejściowego *Operacji Przynajania – Powierzchni Tnącej 1*.
- Linia *Line.23* jest teraz normalna do *Powierzchni Bazowej 2*. Ponieważ orientacja tej powierzchni zmieniła się, orientacja linii *Line.23* również się zmienia na przeciwną.
- Punkty *Point.32* i *Point.33* generowane są na początku i na końcu linii *Line.23*. Ponieważ jednak nastąpiła zmiana orientacji tej linii, to jej początek i koniec zamieniają się miejscami. W związku z tym punkty *Point.32* i *Point.33*, jak i następne operacje modelowania zbudowane w oparciu o te punkty również zamieniają się miejscami (rys. 52).



Rys. 52. Zmiana orientacji linii *Line.23* powodująca zamianę miejscami jej punktu początkowego *Point.32* i punktu końcowego *Point.33* wynikająca ze zmiany orientacji *Powierzchni Bazowej 2*

- d) Utworzone wcześniej *Powierzchnia Przesunięta 1* i *Powierzchnia Przesunięta 2* powiązane z *Powierzchnią Bazową 2* wydają się niezmienione. Nie jest to jednak prawda, bo skoro zwrot wektora *Powierzchni Bazowej 2* uległ zmianie, to zwroty wektorów każdej jej geometrii podrzędnej również ulegają zmianie. W konsekwencji wspomniane powierzchnie zostają przesunięte w przeciwnych niż pierwotnie kierunkach, co wizualnie przekłada się na wzajemną zamianę miejsc. Zatem *Powierzchnia Przesunięta 1* jest teraz w miejscu *Powierzchni Przesuniętej 2*, a *Powierzchnia Przesunięta 2* jest w miejscu *Powierzchni Przesuniętej 1* (patrz: **Krok 1d** Procedury Konstrukcyjnej 1 przed podmianą *Powierzchni Bazowej 1* – rys. 44) (rys. 53). W rozpatrywanej procedurze nie ma to znaczenia, bo utworzona w ten sposób geometria wygląda dokładnie tak samo jak przed podmianą powierzchni bazowej. Jednak ta obserwacja stała się dla autora kluczowa z punktu definiowania wytycznych Modelowania Jednoznacznego, bo owa zamiana miejsc powierzchni przesuniętych przy zmianie ich orientacji ma istotne znaczenie dla jednoznacznego definiowania geometrii.

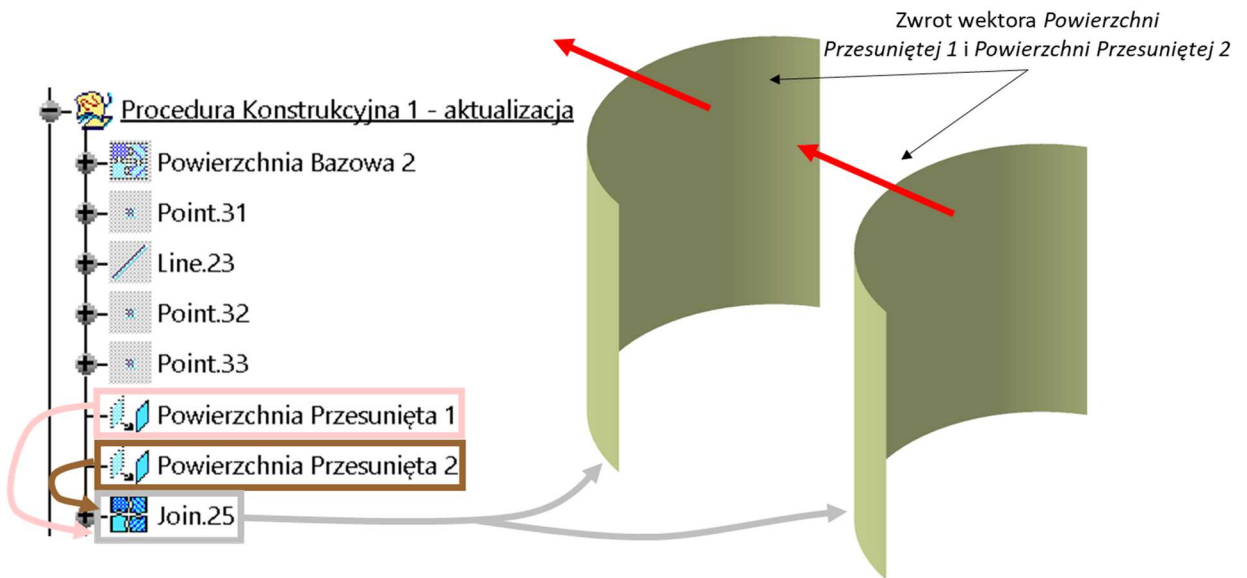


Rys. 53. Zamiana miejsc *Powierzchni Przesuniętej 1* i *Powierzchni Przesuniętej 2* wynikająca ze zmienionego zwrotu wektora *Powierzchni Bazowej 2*

### Krok 2:

Logiczne połączenie zamienionych miejscami *Powierzchni Przesuniętej 1* i *Powierzchni Przesuniętej 2* (*Join.25*) pozostaje wizualnie niezmienione. Ich zwroty wektorów są zgodne ze zwrotem wektora *Powierzchni Bazowej 2* (rys. 54).

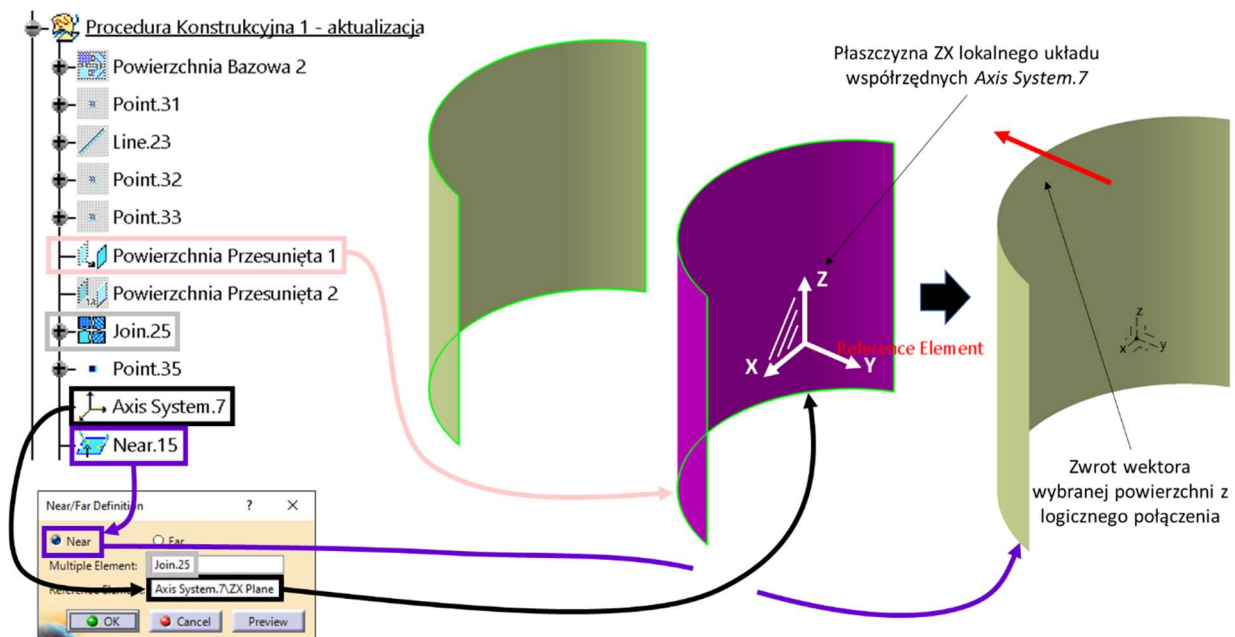




Rys. 54. Utworzenie logicznego połączenia *Join.25* z operacji *Powierzchnia Przesunięta 1* i *Powierzchnia Przesunięta 2* przy użyciu narzędzia programowego *Join*

### Krok 3:

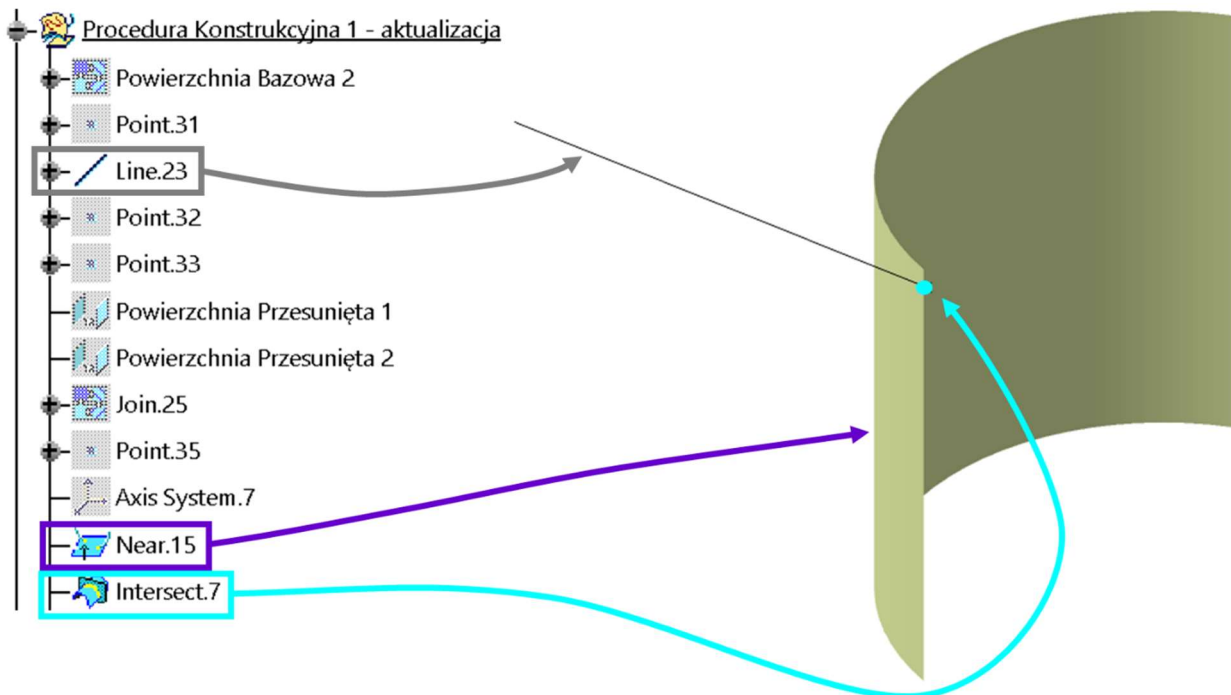
Automatycznie wybrany przez system CAD spośród grupy logicznie połączonej geometrii *Join.25* element w postaci operacji *Near.15* leżący bliżej płaszczyzny ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* również wydaje się niezmienny. Pamiętając jednak o zamianie miejsc przesunąć *Powierzchni Bazowej 2* należy mieć na uwadze, że wybrany element jest inny, mimo, że geometrycznie taki sam jak w pierwotnej procedurze. Wybrana zostaje zatem *Powierzchnia Przesunięta 1*, bo *Powierzchnia Przesunięta 2* po zmianie orientacji znajduje się dalej od płaszczyzny ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* (rys. 55).



Rys. 55. *Powierzchnia Przesunięta 1* w postaci operacji *Near.15* reprezentującej geometrię leżącą bliżej płaszczyzny ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*

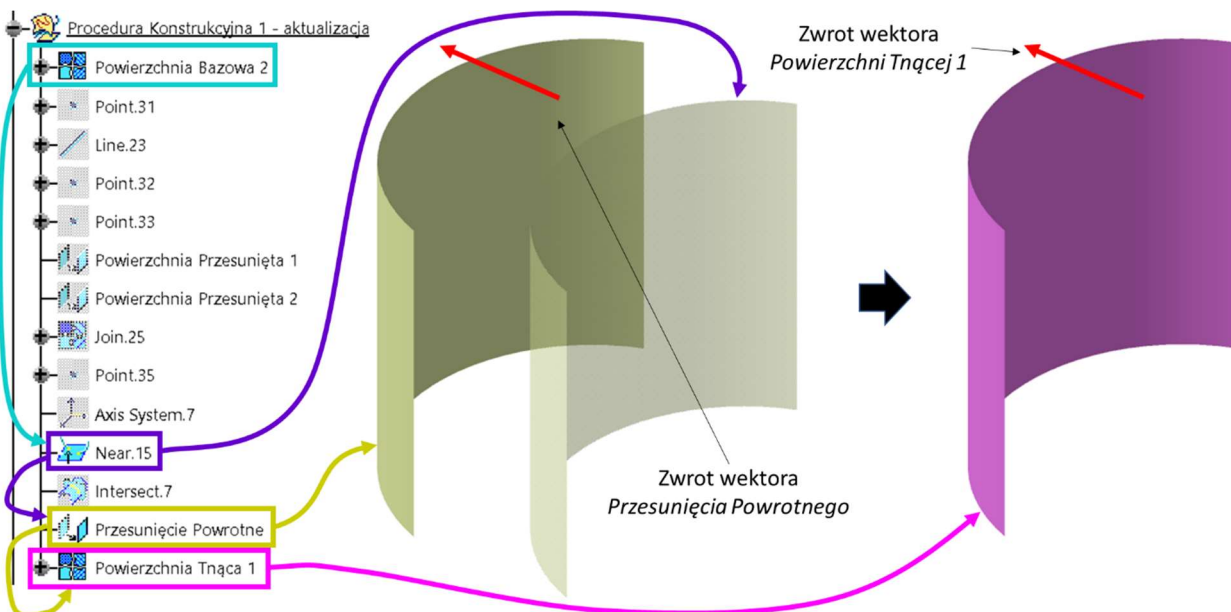
**Krok 4:**

- a) Utworzone przecięcie *Intersect.7* wybranej w **Kroku 3** powierzchni *Near.15* z linią *Line.23* pozostaje bez zmian (rys. 56).



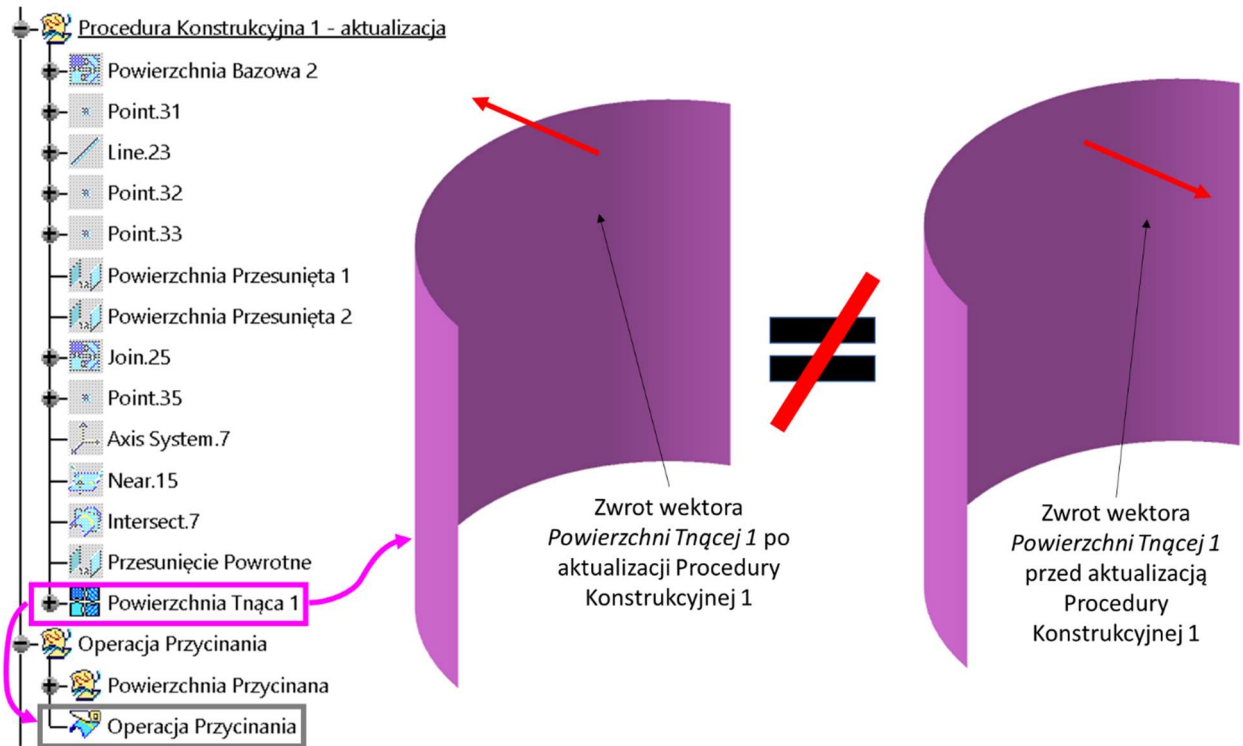
Rys. 56. Przecięcie linii *Line.23* i powierzchni *Near.15* w postaci punktu *Intersect.7*

- b) W tym kroku ujawnia się dwuznaczność aktualizowanej Procedury Konstrukcyjnej 1. Następstwem podmiany *Powierzchni Bazowej 2* mającej przeciwny do *Powierzchni Bazowej 1* zwrot wektora jest zmiana tego zwrotu również dla *Przesunięcia Powrotnego*, a więc również dla końcowej operacji tej procedury – *Powierzchni Tnącej 1* (rys. 57).

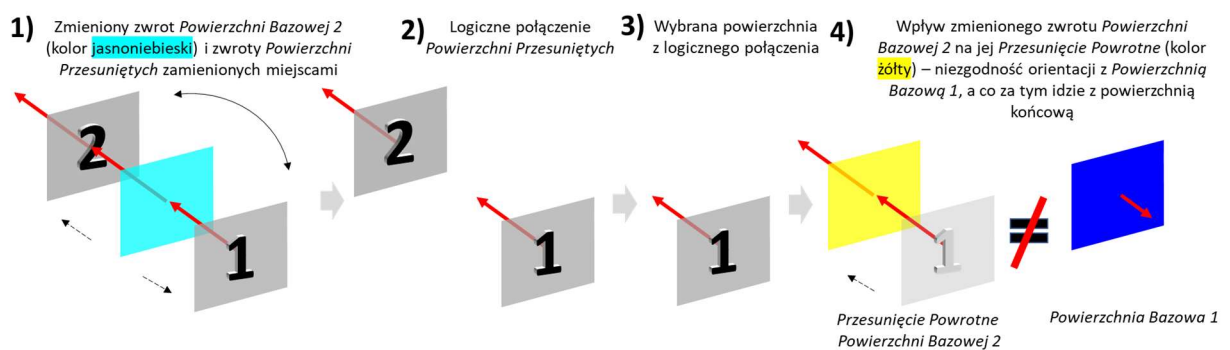


Rys. 57. Dwuznaczność geometryczna aktualizowanej Procedury Konstrukcyjnej 1 polegająca na zmienionym zwrocie wektora jej powierzchni końcowej – *Powierzchni Tnącej 1*, wynikającym ze zmiany zwrotu wektora *Powierzchni Bazowej 2*

Efektom zaktualizowanej Procedury Konstrukcyjnej 1 przedstawionej w uogólniony sposób na rysunku 59 jest powierzchnia końcowa ze zmienioną orientacją w stosunku do jej stanu przed aktualizacją (rys. 58), która w postaci *Powierzchni Tnącej 1* staje się elementem wejściowym *Operacji Przycinania* zilustrowanej na rysunku 37a i zgodnie z opisanymi wcześniej następstwami zmiany tej orientacji – powodująca zamianę fragmentu powierzchni pozostawionego i odcinanego.

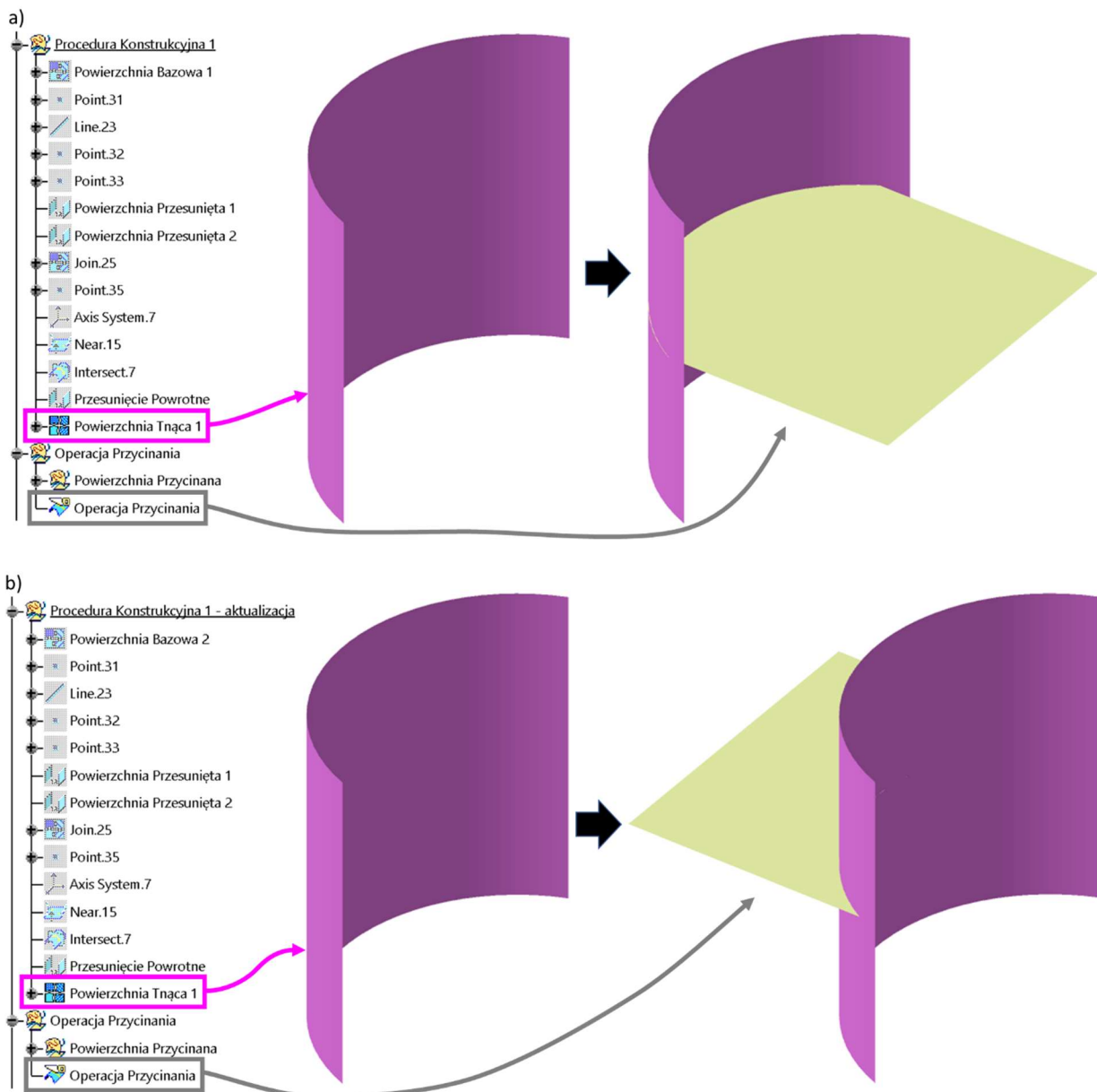


Rys. 58. Rezultat zaktualizowanej Procedury Konstrukcyjnej 1 – zmieniony zwrot wektora powierzchni końcowej w postaci *Powierzchni Tnącej 1* w stosunku do jej stanu przed aktualizacją



Rys. 59. Cztery Kroki zaktualizowanej Procedury Konstrukcyjnej 1

Zatem następstwem dwuznaczności Procedury Konstrukcyjnej 1, w wyniku której definiowana jest *Powierzchnia Tnąca 1*, jest kolejna dwuznaczność ujawniająca się bezpośrednio w samej *Operacji Przycinania*. Tym samym konstruktor nie jest w stanie zdefiniować tej operacji w sposób powtarzalny, czyli niezależny od zmiany orientacji elementów wejściowych (rys. 60).



Rys. 60. Dwuznaczność geometryczna *Operacji Przciniwania*: a) wykorzystanie pierwotnej *Powierzchni Bazowej 1*, której wynikiem jest zamierzony rezultat przycinania powierzchni, b) podmiana *Powierzchni Bazowej 1* na *Powierzchnię Bazową 2*, której wynikiem jest niezamierzony rezultat przycinania powierzchni

Powyższe rozważania na temat Procedury Konstrukcyjnej 1 nie powodującej żadnych wizualnych zmian w *Operacji Przciniwania* przed jej aktualizacją może wydawać się czytelnikowi dziwna, bo przecież taki sam rezultat można otrzymać bez jej wprowadzania. Dodatkowo, dwuznaczność geometryczną owego przycinania można wykazać również bez niej poprzez bezpośrednią zmianę orientacji *Powierzchni Tnącej 1* za pomocą narzędzia programowego *Invert Orientation*. Oczywiście czytelnik będzie miał w tym momencie rację. Jednak powyższy opis był dla autora jedną z wielu faz przejściowych w poszukiwaniu wytycznych zapewniających jednoznaczne, czyli powtarzalne definiowanie przekształcaną w procesie tworzenia modeli 3D geometrii. Jednocześnie autor uznał, że nie ma potrzeby opisywania każdej z tych faz, bo niejednokrotnie prowadziły one do „ślepego zaułka” i nie posuwały przeprowadzanych badań w zamierzonym kierunku. Jednym z kluczowych momentów tych badań było wykorzystanie wspomnianego

narzędzia programowego *Invert Orientation* do zmiany zwrotu wektora wybranego przesunięcia utworzonego w **Kroku 1d** procedury definiującej powierzchnię tnącą dla opisywanej *Operacji Przycinania*. Zatem powracając do sytuacji z rysunku 37, w której dla *Operacji Przycinania* podmieniona zostaje *Powierzchnia Bazowa 1* na *Powierzchnię Bazową 2* o przeciwnej orientacji, aktualizacja Procedury Konstrukcyjnej 2 definiującej element wejściowy do tej operacji wygląda następująco:

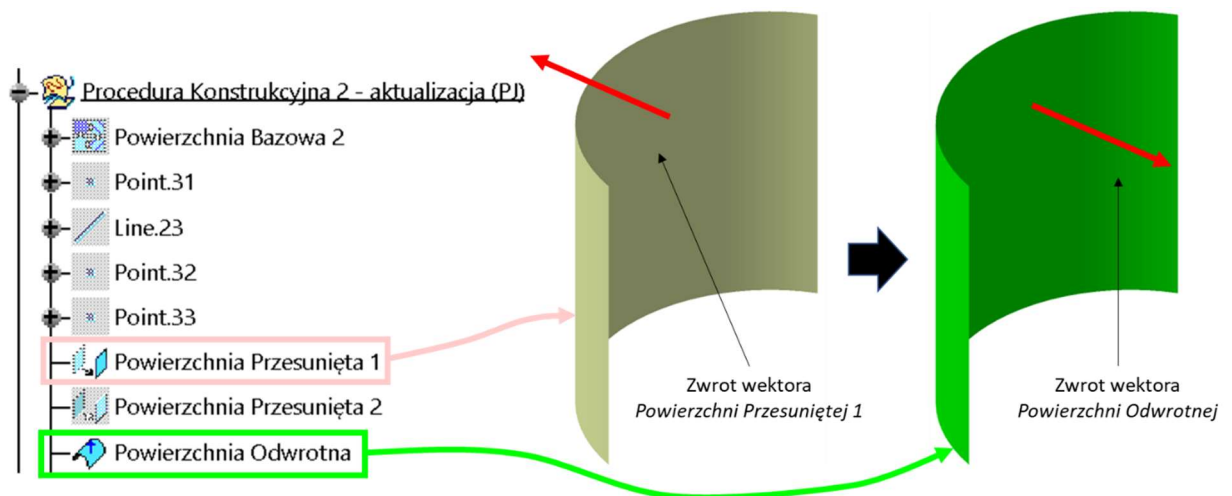
### Procedura Konstrukcyjna 2 – aktualizacja (Procedura Jednoznaczności)

#### Krok 1:

- Ten krok pozostaje taki sam jak **Krok 1a** przy aktualizacji Procedury Konstrukcyjnej 1 – punkt *Point.31* jest punktem środkowym *Powierzchni Bazowej 2*, która jest geometrią nadrzędną dla elementu wejściowego *Operacji Przycinania* – *Powierzchni Tnącej 1*.
- Ten krok pozostaje taki sam jak **Krok 1b** przy aktualizacji Procedury Konstrukcyjnej 1 – linia *Line.23* jest normalna do *Powierzchni Bazowej 2*. Ponieważ orientacja tej powierzchni zmieniła się, orientacja linii *Line.23* również się zmienia na przeciwną.
- Ten krok pozostaje taki sam jak **Krok 1c** przy aktualizacji Procedury Konstrukcyjnej 1 – punkty *Point.32* i *Point.33* generowane są na początku i na końcu linii *Line.23*. Ponieważ jednak nastąpiła zmiana orientacji tej linii, to jej początek i koniec zamieniają się miejscami. W związku z tym punkty *Point.32* i *Point.33*, jak i następne operacje modelowania zbudowane w oparciu o te punkty również zamieniają się miejscami (rys. 52).
- Ten krok pozostaje taki sam jak **Krok 1d** przy aktualizacji Procedury Konstrukcyjnej 1 – *Powierzchnia Przesunięta 1* i *Powierzchnia Przesunięta 2* powiązane z *Powierzchnią Bazową 2* zamieniają się miejscami, czyli *Powierzchnia Przesunięta 1* jest teraz w miejscu *Powierzchni Przesuniętej 2*, a *Powierzchnia Przesunięta 2* jest w miejscu *Powierzchni Przesuniętej 1* (rys. 53).

#### Krok 2:

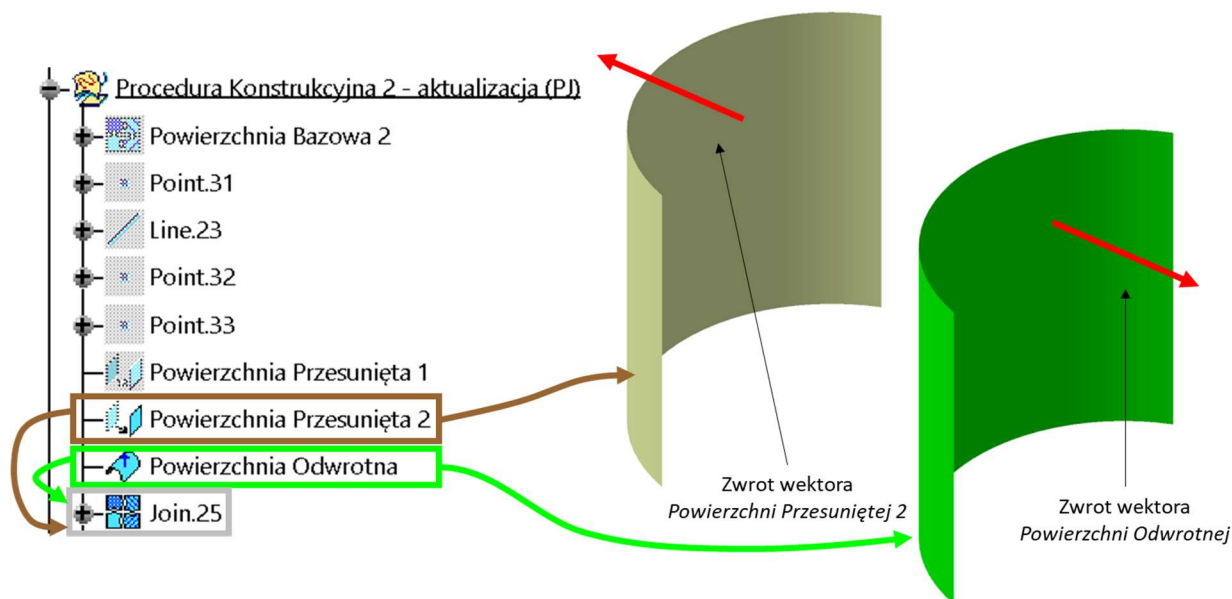
W tym kroku autor wprowadza operację zmiany zwrotu wektora jednego z przesunięć przy użyciu narzędzia programowego *Invert Orientation* – w tym przypadku *Powierzchni Przesuniętej 1*, która ją zastępuje pod postacią *Powierzchni Odwrotnej* (rys. 61).



Rys. 61. Zmiana zwrotu wektora *Powierzchni Przesuniętej 1* poprzez utworzenie *Powierzchni Odwrotnej*

**Krok 3:**

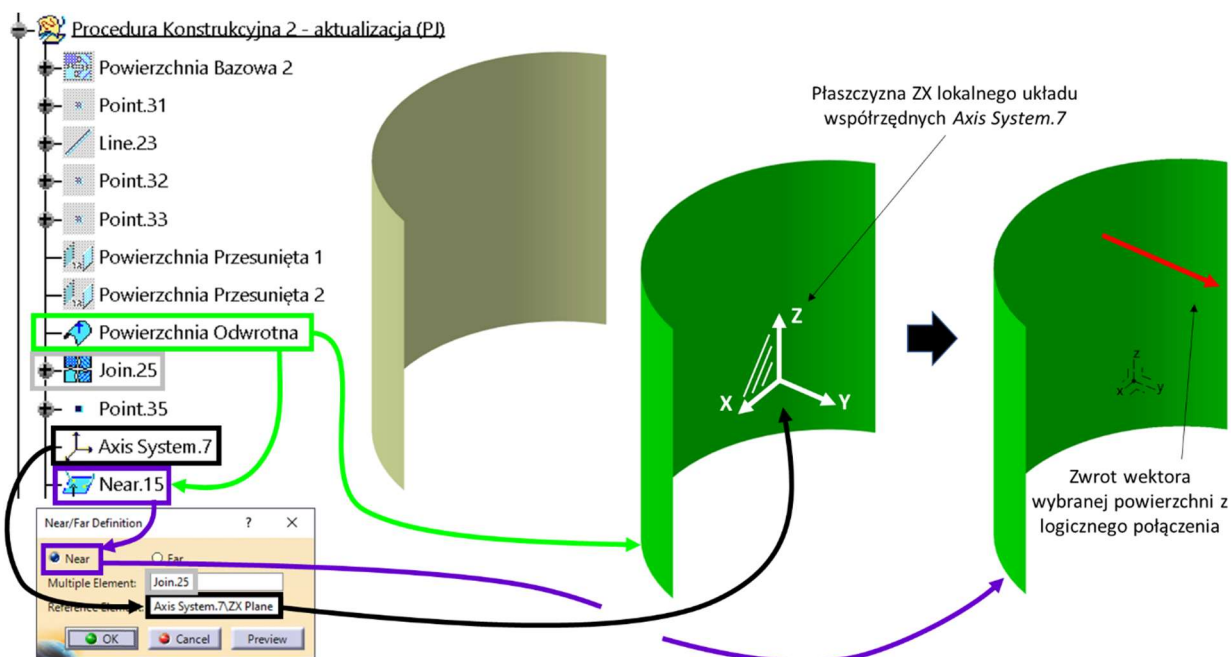
W logicznym połączeniu *Join.25* autor zastępuje *Powierzchnię Przesuniętą 1* *Powierzchnią Odwrotną*, która łączy się z *Powierzchnią Przesuniętą 2*. Zwroty wektorów tych przesunięć są względem siebie przeciwne (rys. 62).



Rys. 62. Zastąpienie w logicznym połączeniu *Join.25* *Powierzchni Przesuniętej 1* *Powierzchnią Odwrotną*

**Krok 4:**

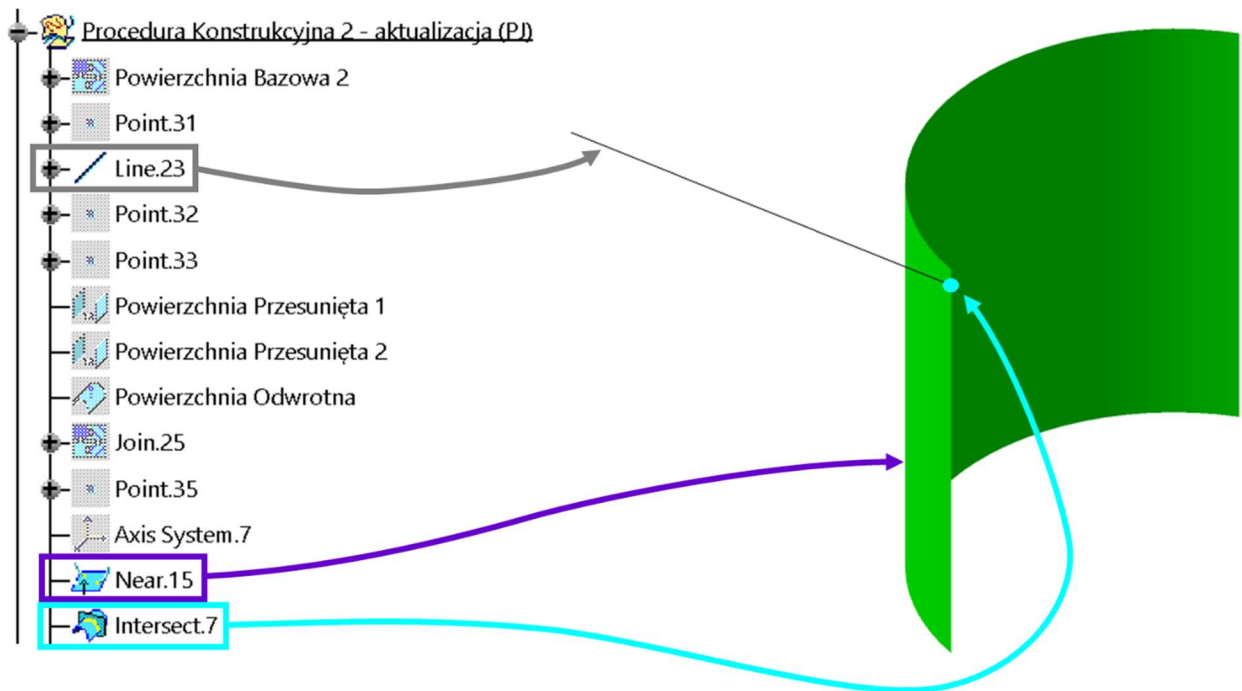
System CAD automatycznie wybiera spośród grupy logicznie połączonej geometrii *Join.25* element leżący bliżej płaszczyzny ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*. W tym przypadku jest to przesunięcie z przeciwnym do *Powierzchni Bazowej 2* zwrotem – *Powierzchnia Odwrotna* pod postacią operacji *Near.15* (rys. 63).



Rys. 63. Automacyjny wybór przez system CAD z logicznego połączenia *Join.25* elementu leżącego bliżej płaszczyzny ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*

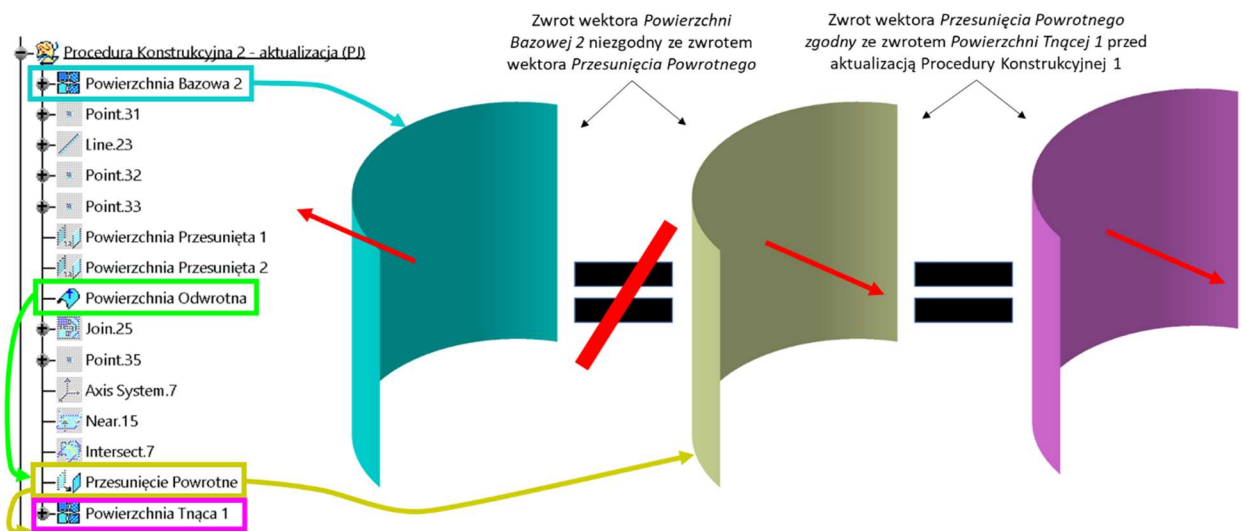
**Krok 5:**

- a) Ten krok pozostaje taki sam jak **Krok 4a** przy aktualizacji Procedury Konstrukcyjnej 1 – przecięcie *Intersect.7* tworzą wybrana w **Kroku 4** powierzchnia *Near.15* z linią *Line.23* (rys. 64).



Rys. 64. Przecięcie linii *Line.23* i powierzchni *Near.15* w postaci punktu *Intersect.7*

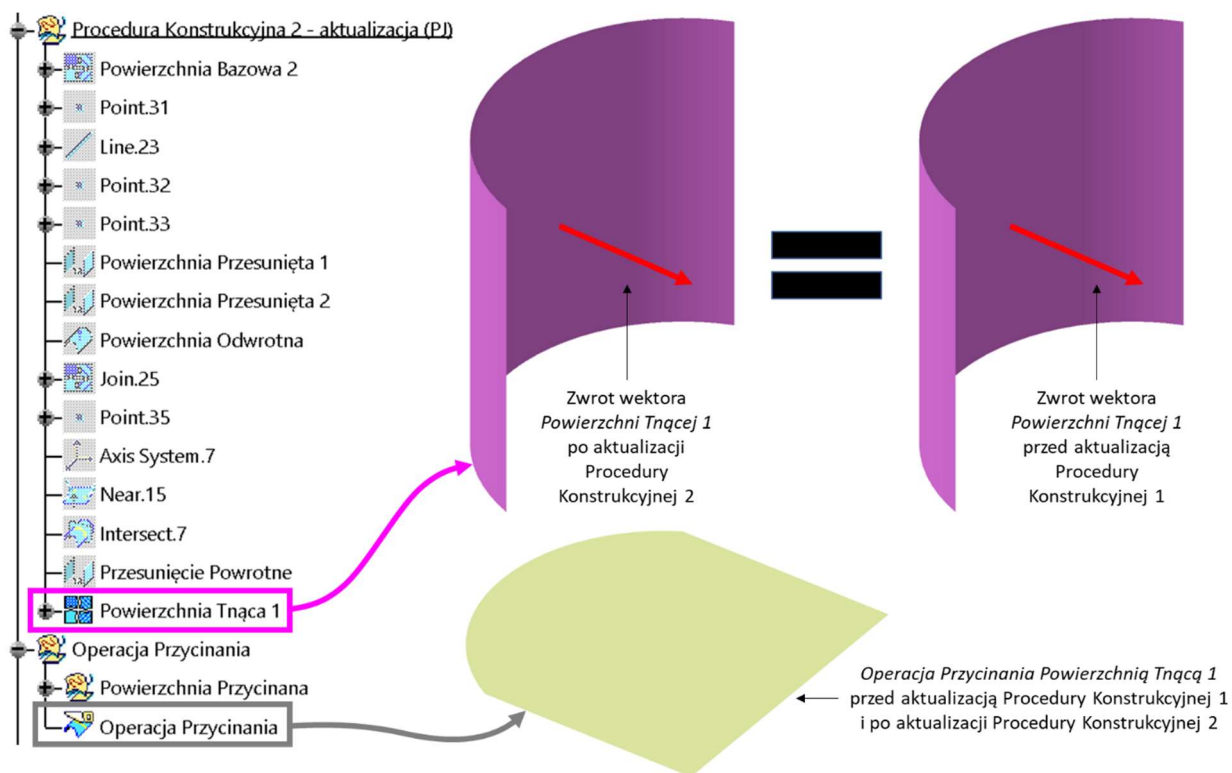
- b) *Przesunięcie Powrotne* jest utworzone na podstawie *Powierzchni Odwrotnej*, a dzięki zastosowaniu narzędzia programowego *Invert Orientation* w **Kroku 2** jej orientacja, mimo że niezgodna z orientacją *Powierzchni Bazowej 2*, pozostaje zgodna z orientacją *Powierzchni Tnącej 1* przed jej aktualizacją (rys. 65).



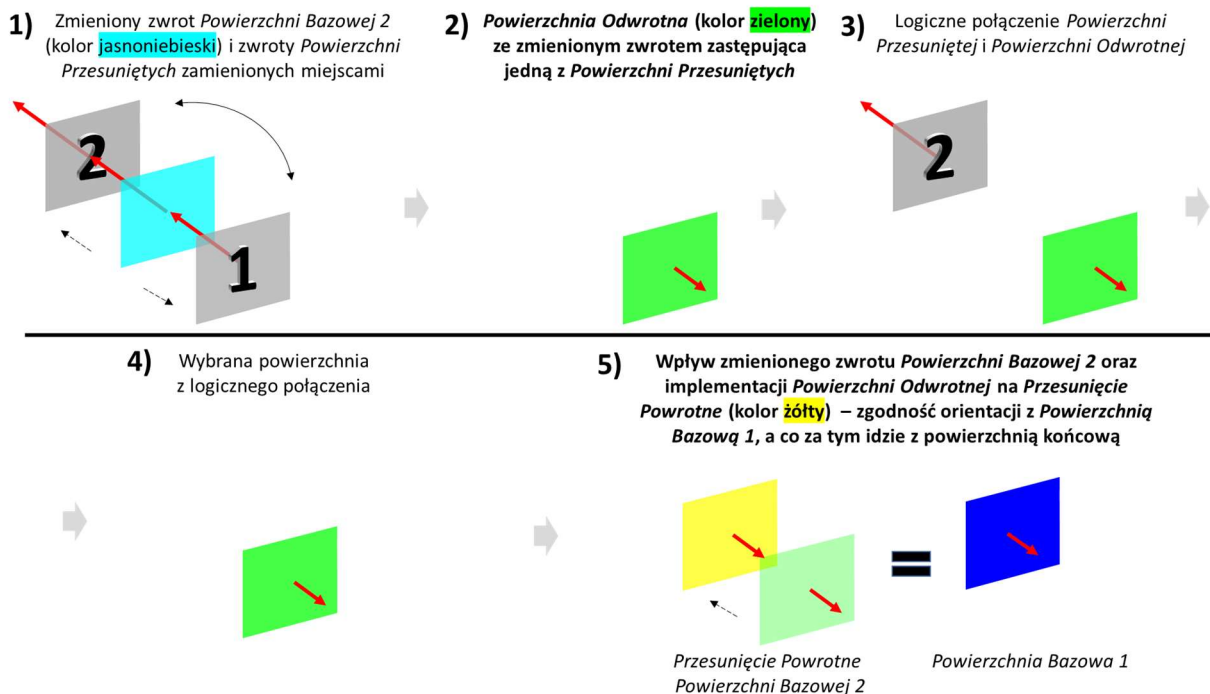
Rys. 65. Zwrot wektora *Przesunięcia Powrotnego* niezgodny ze zwrotem wektora *Powierzchni Bazowej 2*, ale zgodny ze zwrotem wektora *Powierzchni Tnącej 1* przed jej aktualizacją

Efektem zaktualizowanej Procedury Konstrukcyjnej 1 przedstawionej w uogólniony sposób na rysunku 67 jest powierzchnia końcowa z niezmienną orientacją, która w postaci *Powierzchni*

Tnącej 1 staje się elementem wejściowym *Operacji Przycinania* zilustrowanej na rysunku 37a i tym samym nie wpływająca na pierwotny rezultat tej operacji (rys. 66).



Rys. 66. Brak wpływu zmiany orientacji *Powierzchni Bazowej 2* na orientację *Powierzchni Tnącej 1*, a tym samym na pierwotny rezultat *Operacji Przycinania*

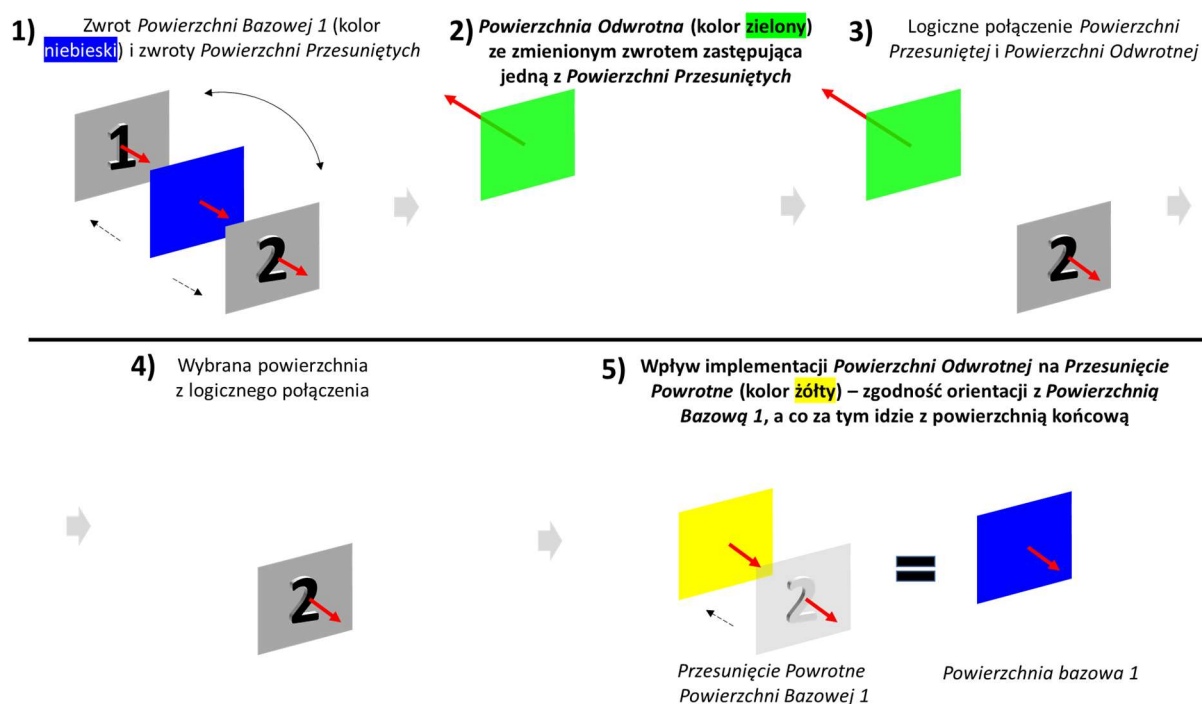


Rys. 67. Pięć Kroków zaktualizowanej *Procedury Konstrukcyjnej 2* (**pierwsza wytyczna Modelowania Jednoznacznego – Procedura Jednoznaczności**)

Powtórna podmiana *Powierzchni Bazowej 2* na pierwotną *Powierzchnią Bazową 1* przedstawiona w uogólniony sposób na rysunku 68 potwierdza skuteczność zaprezentowanej procedury



w *Operacji Przycinania* zilustrowanej na rysunku 37a. Oznacza to, że konstruktor jest w stanie zdefiniować tę operację w sposób powtarzalny, czyli niezależny od zmiany orientacji jej elementu wejściowego. Czytelnik może w tym miejscu wyciągnąć słuszny wniosek, że skoro orientacja elementów wejściowych danej operacji, w której zaimplementowano Modelowanie Jednoznaczone nie generuje niezamierzonych przez konstruktora rezultatów, to tym bardziej geometria tych elementów nie ma wpływu na ten rezultat. Dlatego też autor uznał, że dalsze rozważania na temat powtarzalności przedstawionych wyników w przypadku podmiany *Powierzchni Tnącej 1* na *Powierzchnię Tnącą 2* (rys. 37b) nie są potrzebne.

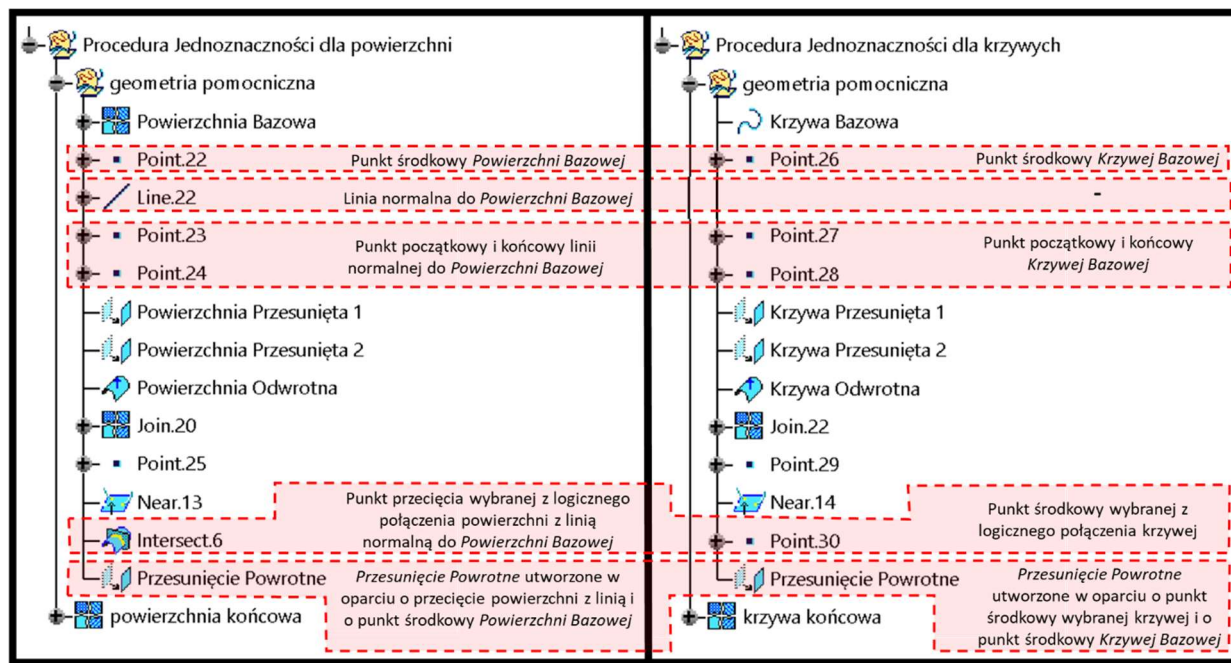


Rys. 68. Pięć Kroków zaktualizowanej Procedury Konstrukcyjnej 2 (**pierwsza wytyczna Modelowania Jednoznacznego – Procedura Jednoznaczności**) – sprawdzenie

Zatem można stwierdzić, że konstruktor poprzez zastosowanie odpowiednich kroków konstrukcyjnych eliminuje dwuznaczność geometrii zorientowanej pozostawiając jednocześnie pozytywne konsekwencje wynikające z możliwości świadomego definiowania jej zwrotu wektora i prowadząc w konsekwencji do utworzenia geometrii jednoznacznej. Rysunki 67 i 68 przedstawiają tym samym pierwszą z dwóch wytycznych Modelowania Jednoznacznego, którą autor sformułował w postaci procedury konstrukcyjnej i nazwał **Procedurą Jednoznaczności**. Mimo, że uogólniona jej postać odnosi się do powierzchni, to ma ona zastosowanie również dla krzywych. W takim przypadku wymagane jest wprowadzenie następujących zmian w częściach składowych **Kroku 1** i **Kroku 5**:

- **Krok 1a** – utworzony punkt jest punktem środkowym *Krzywej Bazowej*, a nie *Powierzchni Bazowej*,
- **Krok 1b** – ten krok jest pomijany, bo nie ma potrzeby odnoszenia się w następnych krokach do dodatkowej linii prostej,
- **Krok 1c** – utworzony punkt początkowy i końcowy odnoszą się do krzywej poddawanej niniejszej procedurze, a nie do dodatkowej linii prostej w przypadku powierzchni,
- **Krok 1d** – w tym kroku następuje utworzenie *Krzywych Przesuniętych* w oparciu o wcześniej utworzone punkty – analogicznie jak w przypadku powierzchni,

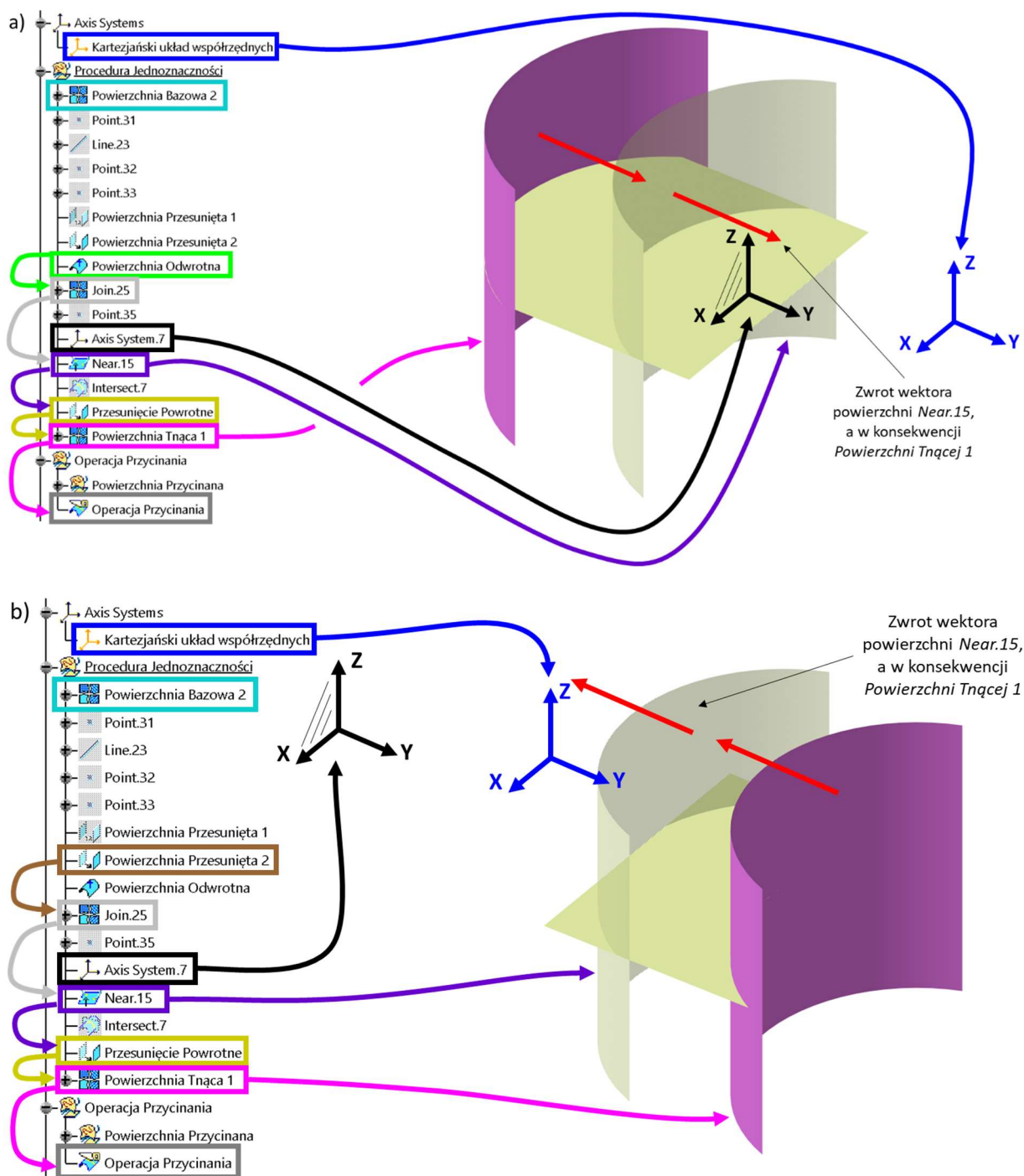
- **Krok 5a** – utworzony punkt przecięcia dodatkowej linii prostej z wybraną powierzchnią w Kroku 4 w przypadku powierzchni zastąpiony jest utworzonym punktem środkowym wybranej w Kroku 4 krzywej,
  - **Krok 5b** – *Przesunięcie Powrotne* utworzone jest w oparciu o wybraną w Kroku 4 krzywą i wcześniej utworzone punkty – analogicznie jak w przypadku powierzchni.
- Powyższe różnice między Procedurami Jednoznaczności zastosowanymi dla powierzchni i krzywych przedstawione są w postaci ich topologii na rysunku 69.



Rys. 69. Różnice topologiczne między Procedurą Jednoznaczności zastosowaną dla powierzchni, a Procedurą Jednoznaczności zastosowaną dla krzywych

Jednak aby procedura ta była w pełni funkcjonalna, a jej zastosowanie można było rozpatrywać w kontekście uniwersalnym należy wprowadzić do niej dodatkową procedurę, której celem jest zapewnienie neutralności geometrycznej wybranej operacji modelowania względem elementów nie wchodzących bezpośrednio w skład struktury geometrii jednoznacznej. Implementacja neutralności dotyczy lokalnego układu współrzędnych, który w swojej neutralnej formie służy do definiowania elementów referencyjnych, względem których wybierany jest element spośród logicznie połączonej geometrii w **Kroku 3** Procedury Jednoznaczności. Użyty w powyższych przykładach element referencyjny w postaci płaszczyzny ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* jest utwierdzony w przestrzeni poprzez punkt bazowy tego układu zdefiniowany w oparciu o *Kartezjański układ współrzędnych*, będący bazowym elementem podstawowym każdego pliku CAD. Nietrudno sobie w tym momencie wyobrazić co się stanie, gdy *Powierzchnia Tnąca 1* jak i *Powierzchnia Przycinana Operacji Przycinania* będą zlokalizowane po przeciwnej jego stronie w stosunku do utworzonej wcześniej Procedury Jednoznaczności *Powierzchni Tnącej 1*. Po podmianie *Powierzchni Bazowej 2* i aktualizacji topologii Procedury Jednoznaczności lokalny układ współrzędnych *Axis System.7* nie zmieni swojej lokalizacji tak, by automatyczny wybór elementu spośród logicznego połączenia *Join.25* utworzonego w **Kroku 3** zachowywał pierwotne kryterium wyboru zdefiniowane przez konstruktora, bo *Kartezjański układ współrzędnych* również nie zmieni swojej lokalizacji. W konsekwencji, w jednym przypadku system CAD zinterpretuje operację *Near.15* jako

Powierznię Odwrotną (rys. 70a), a w drugim przypadku jako Powierznię Przesuniętą 2 (rys. 70b), co doprowadzi do zamiany rezultatu Operacji Przycinania spowodowanej zmianą zwrotu wektora operacji *Near.15*.



Rys. 70. Konsekwencja zastosowania Procedury Jednoznaczności bez zapewnienia neutralności geometrycznej elementowi referencyjnemu w postaci płaszczyzny ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*: a) *Operacja Przycinania* po jednej stronie *Kartezjańskiego układu współrzędnych*, b) *Operacja Przycinania* po drugiej stronie *Kartezjańskiego układu współrzędnych*

Zatem przedstawiona w następnym rozdziale Procedura Neutralności będzie polegała na uniezależnieniu lokalnego układu współrzędnych przeznaczonego do definiowania elementów referencyjnych Procedury Jednoznaczności od stałego odniesienia jakim może być *Kartezjański*

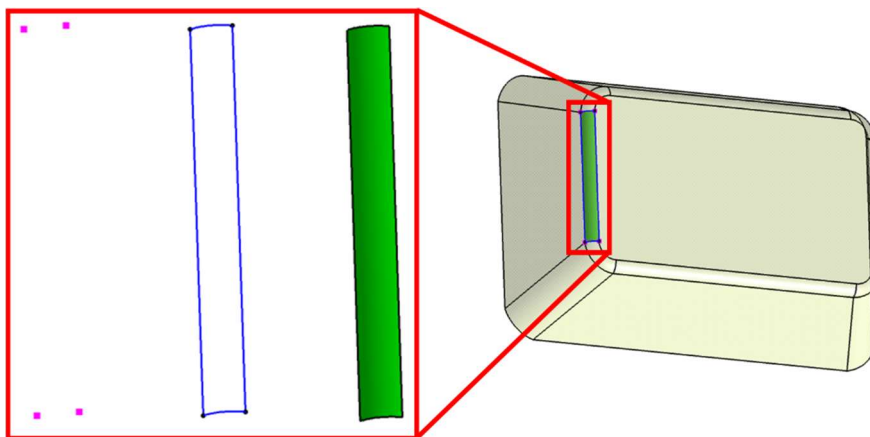
układ współrzędnych każdego pliku CAD tak, by elementy te mogły „podążać” za geometrią, która ma zostać poddana procesowi jednoznaczności.

### 4.3 Wytyczne Modelowania Jednoznacznego – Procedura Neutralności

Procesowi jednoznaczności poddawana jest geometria będąca elementem wejściowym kolejno tworzonych operacji modelowania, za pomocą których konstruktor generuje model CAD. Jeśli więc opisana w punkcie 4.2 Rozdziału 4 *Operacja Przycinania* jest jednocześnie „rodzicem” innych operacji, to eliminacja dwuznaczności jej elementów wejściowych będzie oznaczała eliminację dwuznaczności geometrycznej wszystkich jej „dzieci”. Oczywiście „dzieci” te mogą posiadać elementy nadrzędne nie związane z jedną operacją przycinania. W związku z powyższym można wyciągnąć prosty wniosek, że im wcześniej ów proces jednoznaczności zostanie wprowadzony do drzewa struktury modelu 3D, tym większa liczba operacji zostanie tym procesem objęta. W konsekwencji optymalizacja struktury asocjatywnych modeli CAD będzie polegała na poddaniu procesowi jednoznaczności tylko elementów wejściowych tych modeli tak, by wszystkie jego operacje były zbudowane w oparciu o geometrię jednoznaną.

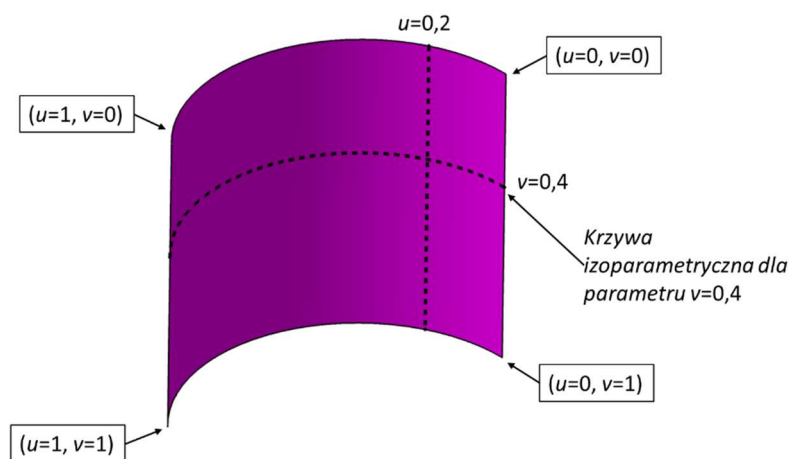
Drugą wytyczną Modelowania Jednoznacznego, ponownie sformułowaną w postaci procedury konstrukcyjnej, prowadzącą do uzyskania geometrii jednoznacznej jest nazwana przez autora **Procedura Neutralności**. Głównymi narzędziami programowymi wykorzystanymi w tej procedurze są narzędzia realizujące następujące funkcje:

- 1) Wyodrębnianie geometrii takiej jak: powierzchnie, krzywe czy punkty z innej geometrii – w systemie CATIA V5 narzędzie programowe *Extract* (rys. 71).



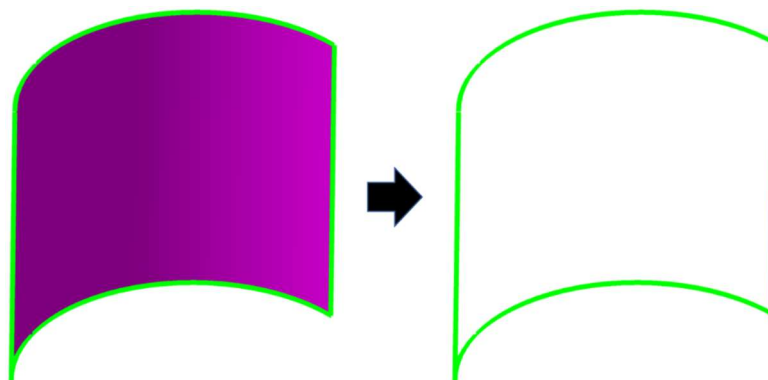
Rys. 71. Wyodrębnianie geometrii (punkty, krzywe, powierzchnie) przy użyciu narzędzia programowego *Extract*

- 2) Generowanie krzywej izoparametrycznej, czyli krzywej tworzącej geometryczną definicję Powierzchni Parametrycznie Swobodnej, dla której jeden z parametrów tej powierzchni ( $u$  lub  $v$ ) ma stałą wartość [62]. Temat ten został szerzej poruszony w punkcie 3.2.3 Rozdziału 3 zatytułowanym *Powierzchnie Parametrycznie Swobodne*. W systemie CATIA V5 funkcję tę realizuje narzędzie programowe *Isoparametric Curve* (rys. 72).



Rys. 72. Przykład generowania dwóch krzywych izoparametrycznych dla stałej wartości parametru  $u=0,2$  i  $v=0,4$  przy użyciu narzędzia programowego *Isoparametric Curve*

- 3) Tworzenie krzywej granicznej wskazanego płata powierzchni [62] – w systemie CATIA V5 narzędzie programowe *Boundary* (rys. 73).



Rys. 73. Tworzenie krzywej granicznej wskazanego płata powierzchni przy użyciu narzędzia programowego *Boundary*

Oprócz powyższych narzędzi programowych wykorzystane zostały te same narzędzia co w przypadku definiowania Procedury Jednoznaczności (*Near/Far*, *Invert Orientation*, *Join*, *Intersection*) oraz prymitywy geometryczne w postaci punktu, linii prostych i płaszczyzny – w systemie CATIA V5 narzędzia programowe *Point*, *Line* i *Plane*.

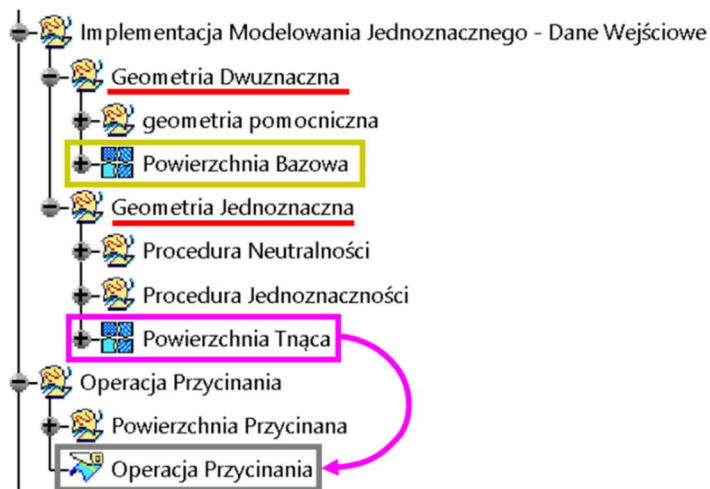
Procedura Neutralności zostanie zintegrowana z przedstawioną w poprzednim punkcie Procedurą Jednoznaczności *Powierzchni Tnącej 1 Operacji Przycinania* (rys. 37). Od tego momentu autor wprowadza także pewne uproszczenia w wykorzystywanym do tej pory nazewnictwie kluczowych geometrii w taki sposób, że:

- *Powierzchnia Bazowa 2* to teraz *Powierzchnia Bazowa*,
- *Powierzchni Tnąca 1* to teraz *Powierzchnia Tnąca*.

Celem poniższej integracji obu wytycznych Modelowania Jednoznaczego jest uzyskanie geometrycznej neutralności lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* w stosunku do *Kartezjańskiego układu współrzędnych*, by w konsekwencji móc rozpatrywać proponowaną metodykę w kontekście uniwersalnym. Tym samym układ *Axis System.7* definiowany poprzez Procedurę Neutralności stanie się geometrycznie neutralną operacją modelowania przeznaczoną do wyznaczania elementu referencyjnego Procedury Jednoznaczności. Drzewo struktury modelu 3D zawierające wytyczne Modelowania Jednoznaczego jest utworzone w oparciu o wytyczne

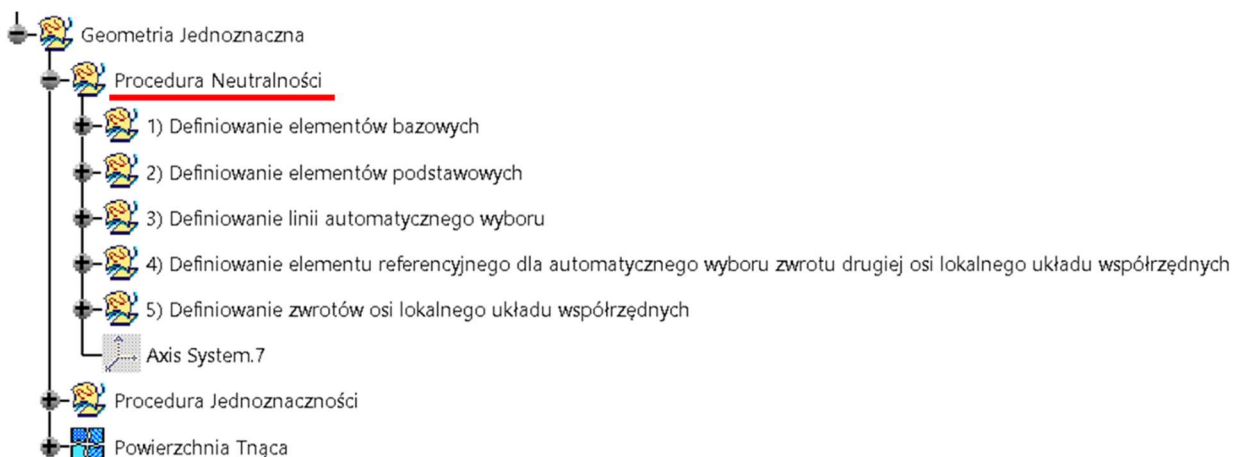
Modelowania Poziomego, które zostały opisane w punkcie 3.3.2 Rozdziału 3 oraz Załączniku do niniejszej pracy. Pozwala to na zachowanie spójności i przejrzystości topologicznej tego drzewa w następstwie ułatwiając przyszłemu użytkownikowi dostęp do istotnych jego rejonów. Jednak w przeciwieństwie do opisanych w Załączniku przykładów, autor zdecydował się nie wprowadzać do topologii asocjatywnych kopii geometrii, by uzyskać jak największą zwięzłość przedstawianych procedur konstrukcyjnych. W związku z tym proces implementacji Modelowania Jednoznacznego do *Operacji Przycinania* jest podzielony na dwa główne zestawy geometryczne:

- 1) *Geometria Dwuznaczna* – lokalizacja *Powierzchni Bazowej*, która zostanie poddana procesowi eliminacji dwuznaczności,
- 2) *Geometria Jednoznaczna* – lokalizacja *Powierzchni Tnącej*, będąca jednoznaczną formą *Powierzchni Bazowej* bezpośrednio wykorzystana w *Operacji Przycinania* (rys. 74).



Rys. 74. Topologia procesu implementacji Modelowania Jednoznacznego do *Operacji Przycinania*

Zestaw geometryczny *Geometrii Jednoznacznej* jest podzielony na zestaw *Procedura Neutralności* i zestaw *Procedura Jednoznaczności*. Ich kolejność wynika z nadrzędności i podrzędności jednej procedury nad drugą – *Procedura Neutralności* jest nadrzędna, bo jej rezultat – lokalny układ współrzędnych *Axis System.7*, służy do budowy *Procedury Jednoznaczności*, a tym samym do budowy *Powierzchni Tnącej*. Geometria *Procedury Neutralności* jest pogrupowana w dodatkowych zbiorach odzwierciedlających kolejne kroki jej tworzenia (rys. 75).



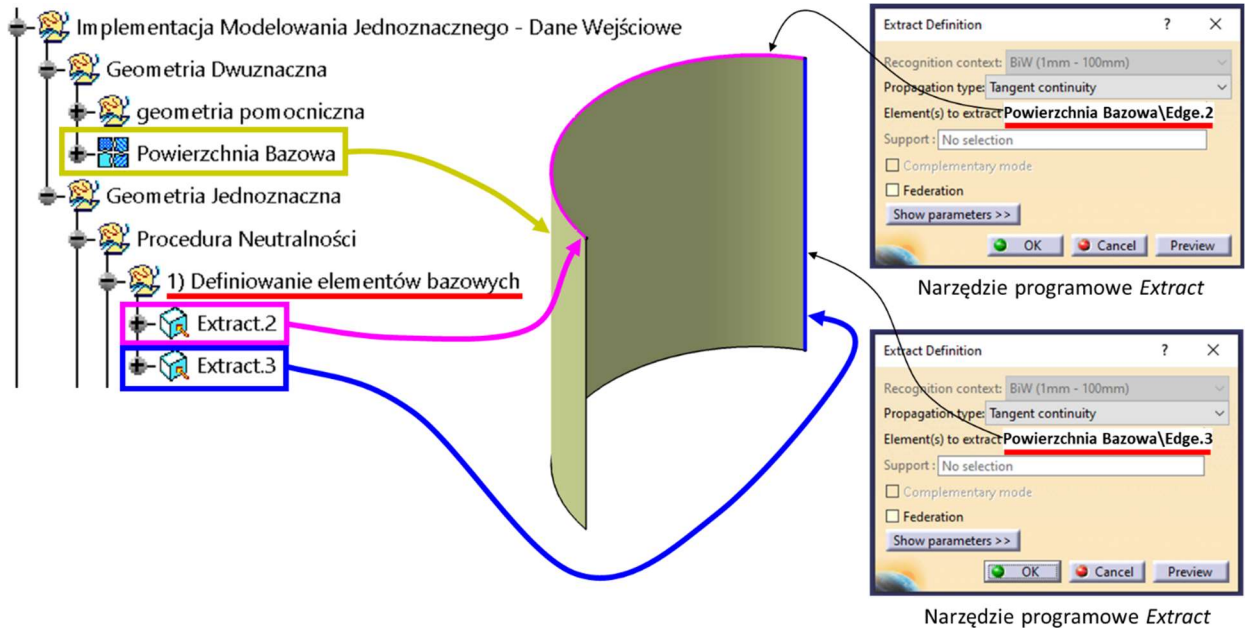
Rys. 75. Topologia *Procedury Neutralności* odzwierciedlająca kolejne kroki jej tworzenia

Kroki te przedstawiają się następująco:

### Procedura Neutralności

#### Krok 1:

**Definiowanie elementów bazowych** – polega na wyodrębnieniu dwóch krzywych z krawędzi *Powierzchni Bazowej*, z których pierwsza (*Extract.2*) pełni rolę przyszłego elementu pozycjonującego lokalny układ współrzędnych *Axis System.7*, a druga (*Extract.3*) jest przyszłym elementem referencyjnym dla automatycznego wyboru zwrotu jednej z jego osi (rys. 76).

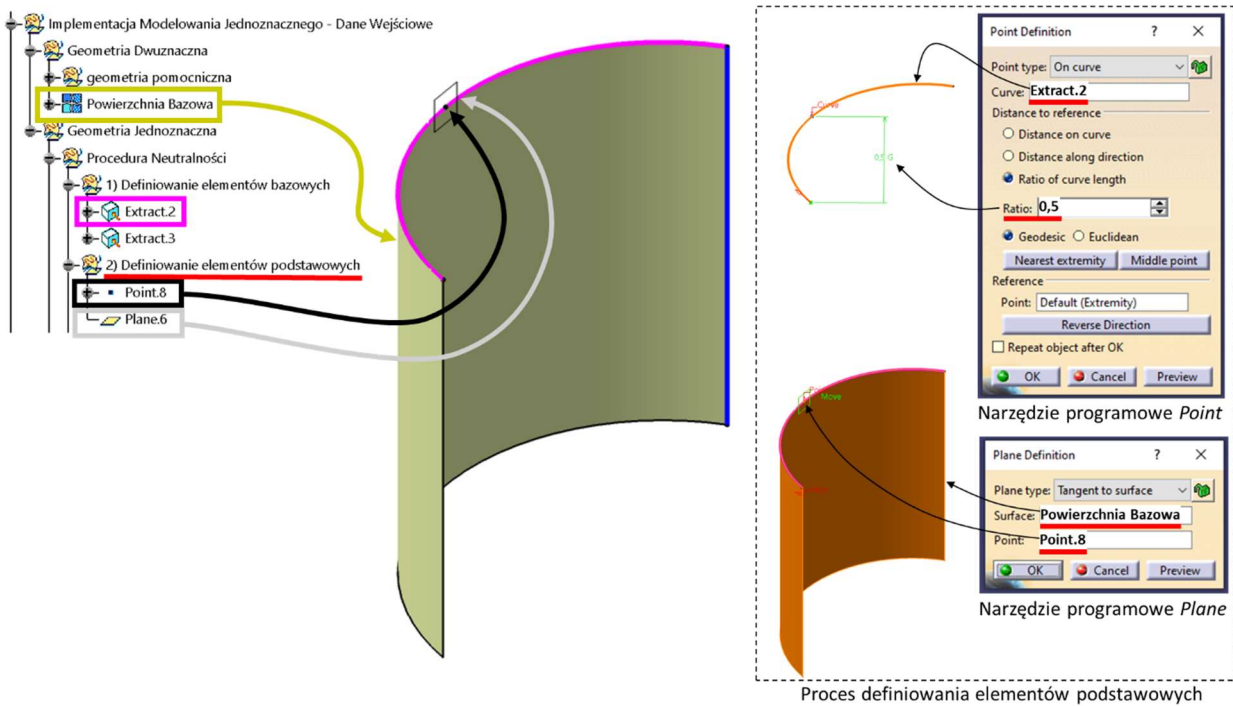


Rys. 76. Procedura Neutralności – definiowanie elementów bazowych

Należy tutaj zwrócić uwagę, że definiowanie lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* związane jest z wyznaczeniem punktu początkowego i zwrotów dwóch jego osi. Dlatego **Krok 4** niniejszej procedury polega na wyznaczeniu elementu referencyjnego dla automatycznego wyboru zwrotu drugiej osi tego układu. **Krok 1** Procedury Neutralności jest ważny z punktu ewentualnej podmiany *Powierzchni Bazowej* – konstruktor musi mieć świadomość, które krawędzie nowej powierzchni bazowej wybrać do wyodrębnienia krzywych, by pozycja i orientacja lokalnego układu współrzędnych spełniała jego pierwotne kryteria wyboru.

#### Krok 2:

**Definiowanie elementów podstawowych** – polega na utworzeniu punktu środkowego *Point.8* krzywej *Extract.2* oraz płaszczyzny *Plane.6* opartej o punkt środkowy *Point.8*, która jest styczna do *Powierzchni Bazowej* (rys. 77).

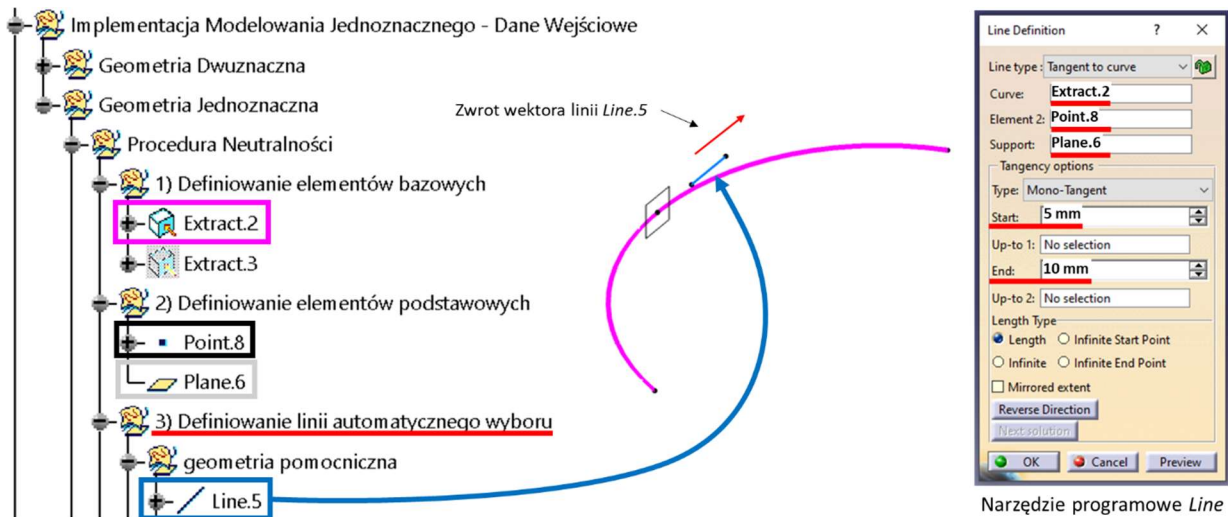


Rys. 77. Procedura Neutralności – definiowanie elementów podstawowych

**Krok 3:**

**Definiowanie linii automatycznego wyboru** – polega na utworzeniu dwóch par linii w przeciwnych do siebie kierunkach (*Join.7*, *Join.8*), z których system CAD będzie automatycznie dokonywał wyboru linii przeznaczonych do wyznaczenia zwrotów osi lokalnego układu współrzędnych. Operacje *Join.7* i *Join.8* stanowią zatem logiczne połączenia wygenerowane na podstawie następującej geometrii:

- *Line.5* – linia oparta o punkt środkowy *Point.8*, leżąca na płaszczyźnie *Plane.6* i styczna do krzywej *Extract.2*. Początek linii *Line.5* rozpoczyna się w pewnej odległości od punktu *Point.8*. Odległość ta, długość samej linii, jak i zwrot jej wektora nie jest istotna (rys. 78).



Rys. 78. Procedura Neutralności – definiowanie linii automatycznego wyboru *Line.5*

- *Line.8* – linia oparta o punkt środkowy *Point.8*, leżąca na płaszczyźnie *Plane.6* i styczna do krzywej *Extract.2*. Początek linii *Line.8* rozpoczyna się w pewnej odległości od punktu *Point.8*, a jej kierunek jest przeciwny do linii *Line.5*. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę,

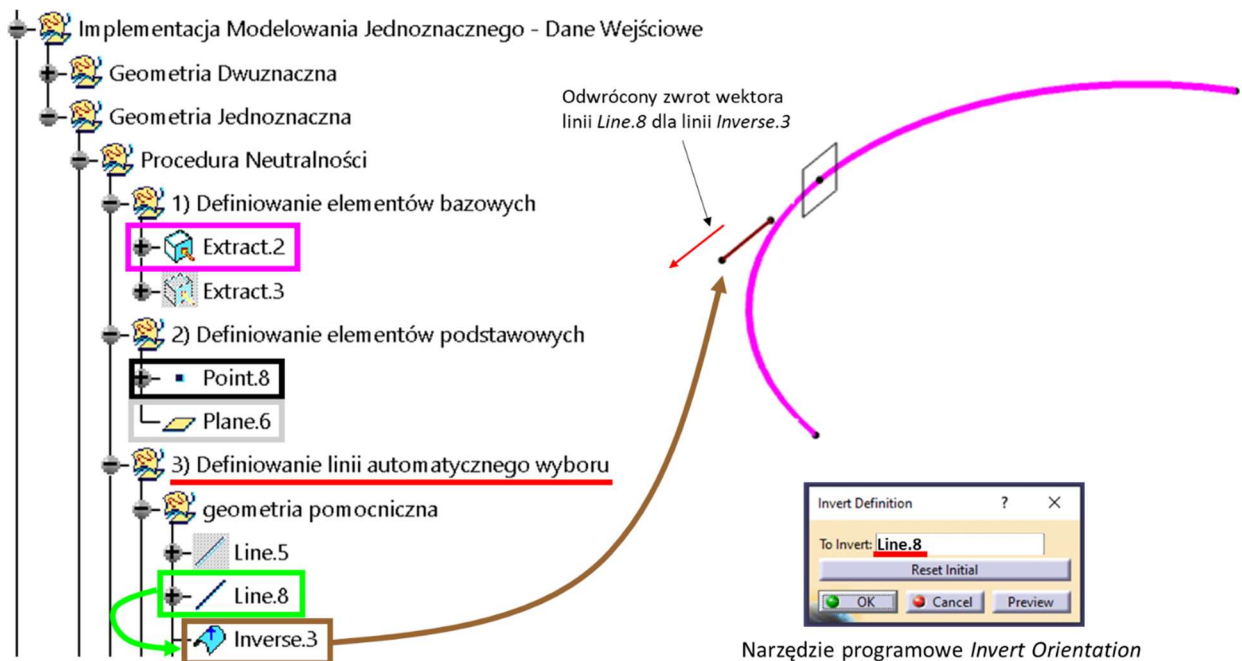


że „przeciwny kierunek” nie oznacza zmiany orientacji linii. Odległość od punktu *Point.8*, długość, jak i zwrot wektora linii *Line.8* są takie same jak linii *Line.5* (rys. 79).



Rys. 79. Procedura Neutralności – definiowanie linii automatycznego wyboru *Line.8*

- *Inverse.3* – zmiana zwrotu wektora linii *Line.8* przy użyciu narzędzia programowego *Invert Orientation* (rys. 80).

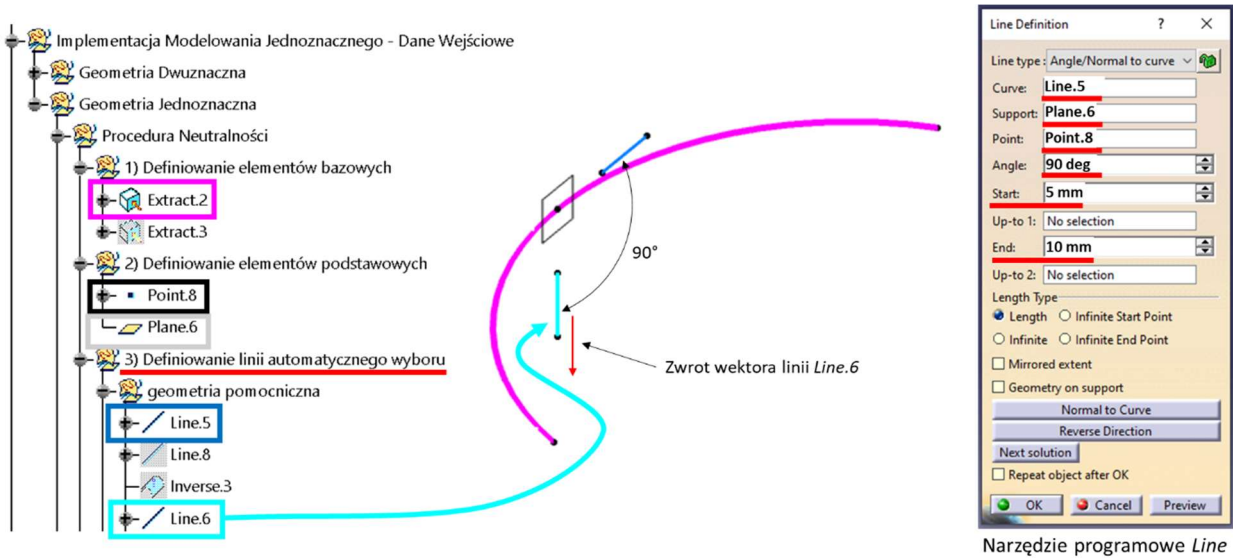


Rys. 80. Procedura Neutralności – zmiana zwrotu wektora linii *Line.8* przy użyciu narzędzia programowego *Invert Orientation*

Autor w tym miejscu zwraca uwagę na wykorzystanie tego samego narzędzia z podobnym zamiarem jak w Procedurze Jednoznaczności. Omawiane bowiem procedury nie muszą zawsze przybierać swojej pełnej formy. Świadome stosowanie wybranych operacji tych procedur pozwala uprościć topologię modelu 3D i jednocześnie zachować jego stabilność geometryczną. Dlatego też w tym samym jak dla Procedury Jednoznaczności kontekście należy rozpatrywać użyty w **Kroku 1** i **Kroku 4** Procedury Neutralności zwrot „element

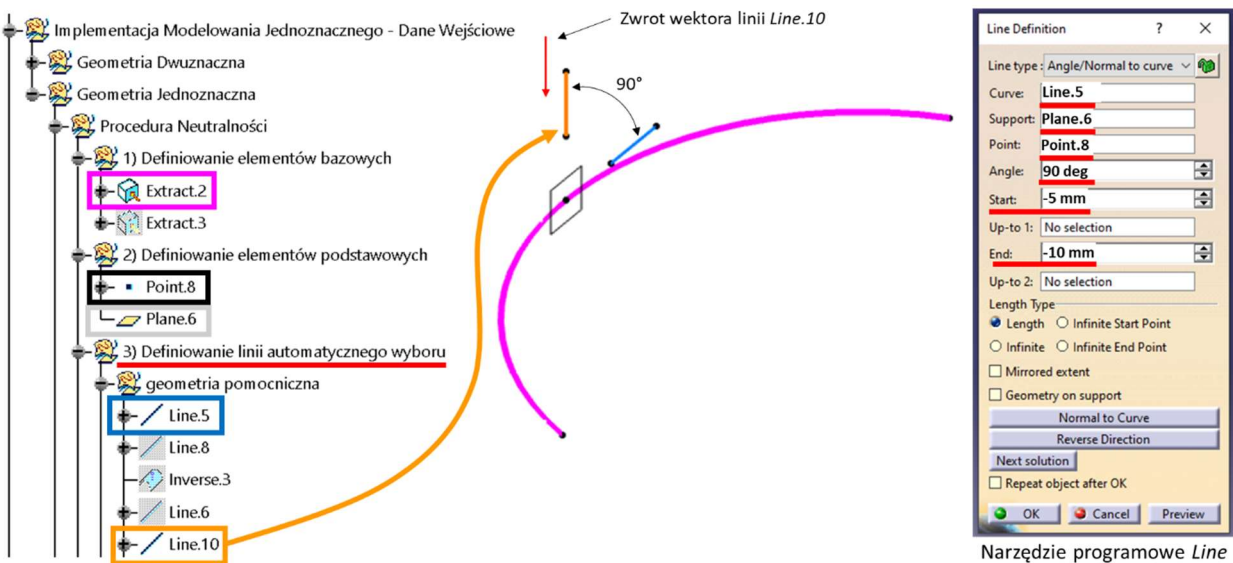
referencyjny” odnoszący się do geometrii, dzięki której system CAD będzie automatycznie wybierał jedną z geometrii z ich zbioru logicznego połączenia.

- *Line.6* – linia oparta o punkt środkowy *Point.8*, która leży na płaszczyźnie *Plane.6* i jest zorientowana do linii *Line.5* pod kątem  $90^\circ$ . Początek linii *Line.6* rozpoczyna się w pewnej odległości od punktu *Point.8*. Odległość ta, długość samej linii, jak i zwrot jej wektora nie jest istotna (rys. 81).



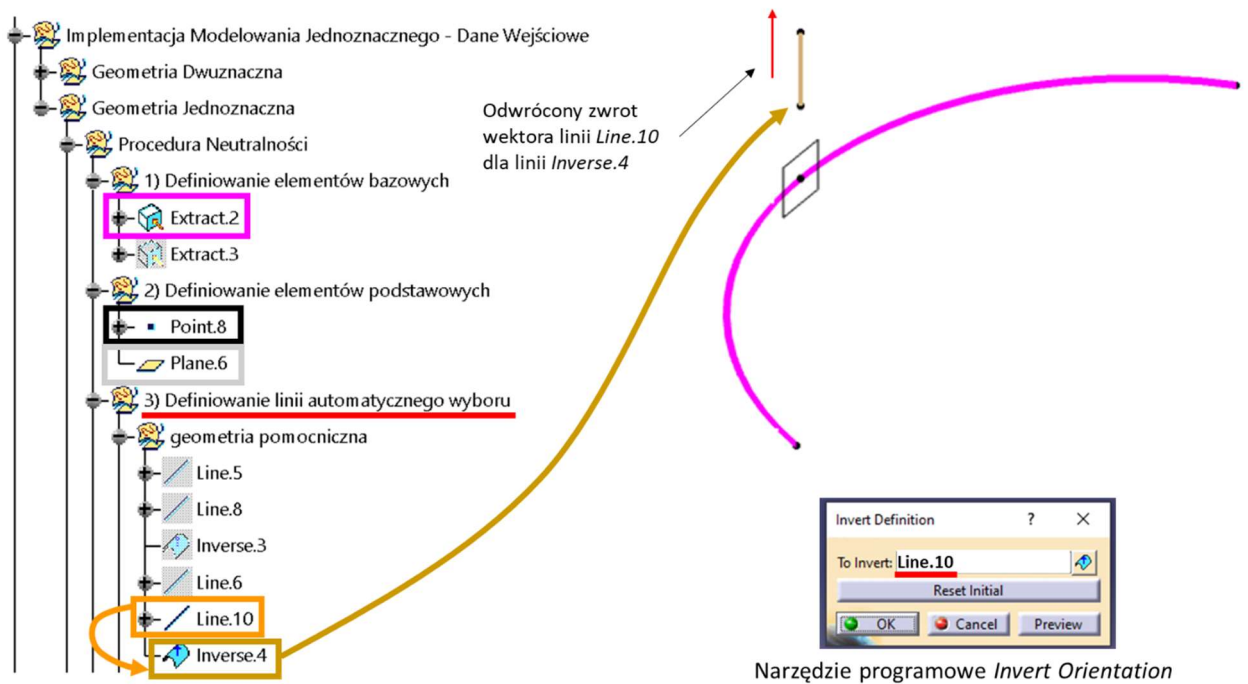
Rys. 81. Procedura Neutralności – definiowanie linii automatycznego wyboru *Line.6*

- *Line.10* – linia oparta o punkt środkowy *Point.8*, która leży na płaszczyźnie *Plane.6* i jest zorientowana do linii *Line.5* pod kątem  $90^\circ$ . Początek linii *Line.10* rozpoczyna się w pewnej odległości od punktu *Point.8*, a jej kierunek jest przeciwny do linii *Line.6*. Odległość od punktu *Point.8*, długość, jak i zwrot wektora linii *Line.10* są takie same jak linii *Line.6* (rys. 82).



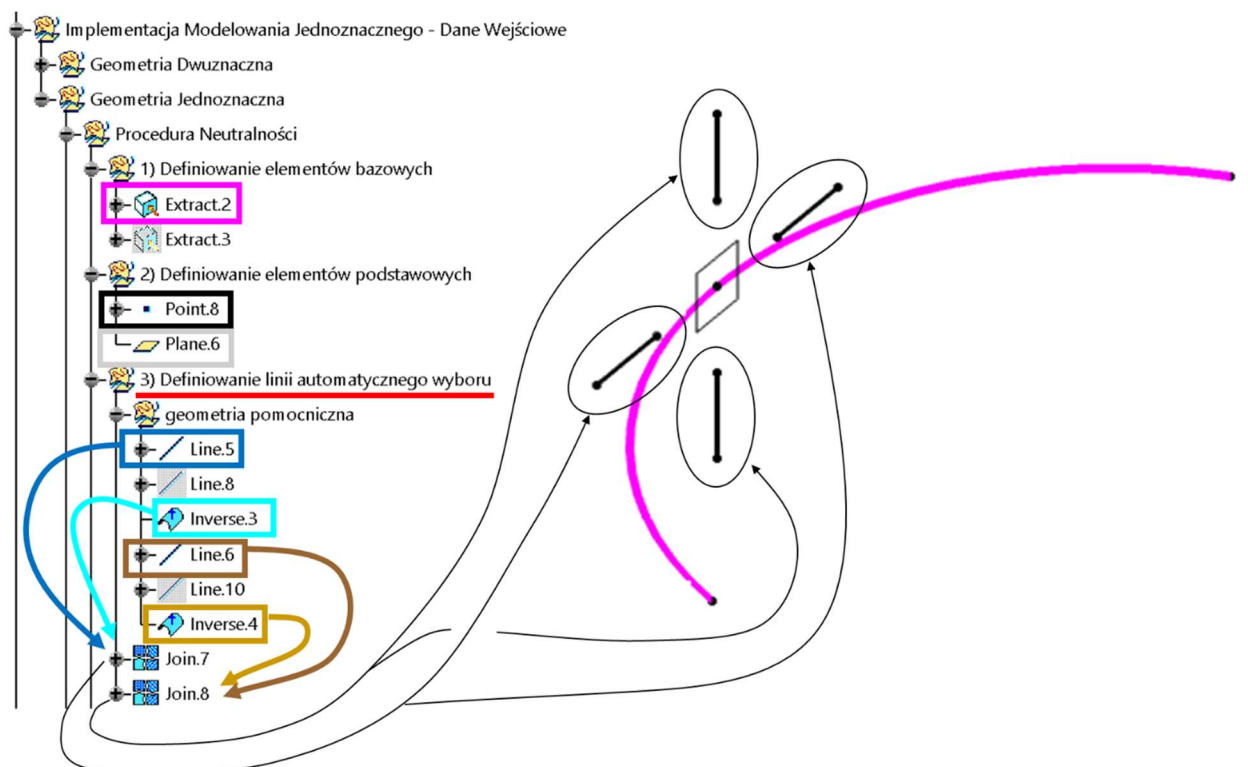
Rys. 82. Procedura Neutralności – definiowanie linii automatycznego wyboru *Line.10*

- *Inverse.4* – zmiana zwrotu wektora linii *Line.10* przy użyciu narzędzia programowego *Invert Orientation* (rys. 83).



Rys. 83. Procedura Neutralności – zmiana zwrotu wektora linii *Line.10* przy użyciu narzędzia programowego *Invert Orientation*

Logiczne połączenie *Join.7* składa się z linii *Line.5* i *Inverse.3*, a logiczne połączenie *Join.8* składa się z linii *Line.6* i *Inverse.4* (rys. 84).

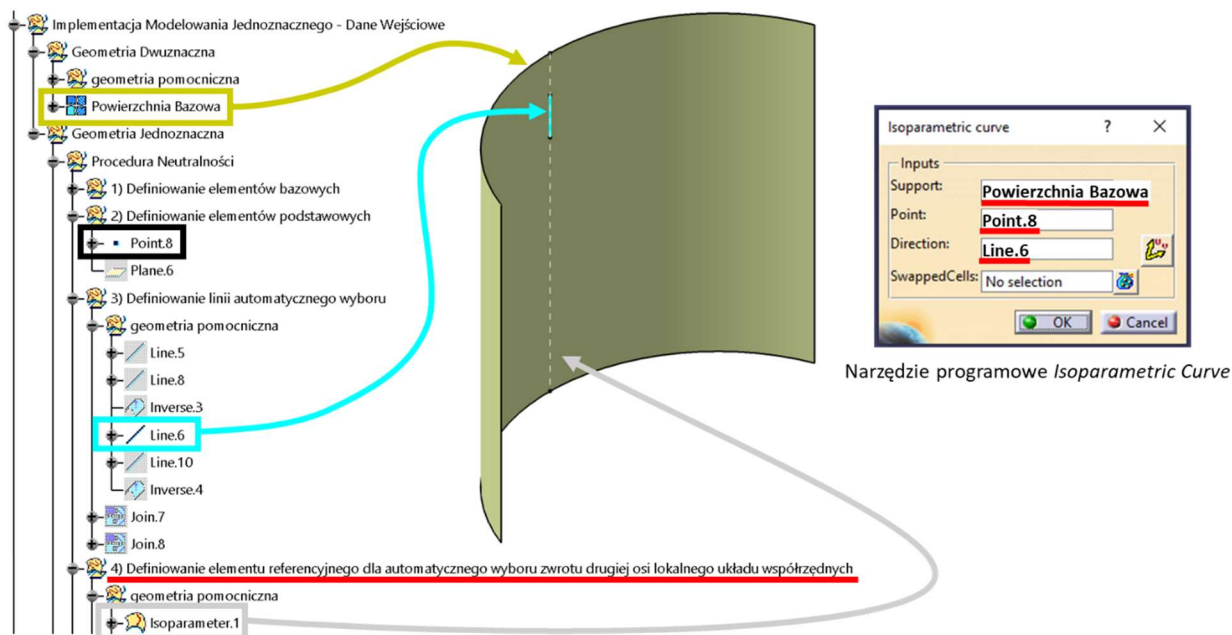


Rys. 84. Procedura Neutralności – logiczne połączenia linii *Line.5*, *Inverse.3*, *Line.6*, *Inverse.4* w postaci operacji *Join.7* i *Join.8*

**Krok 4:**

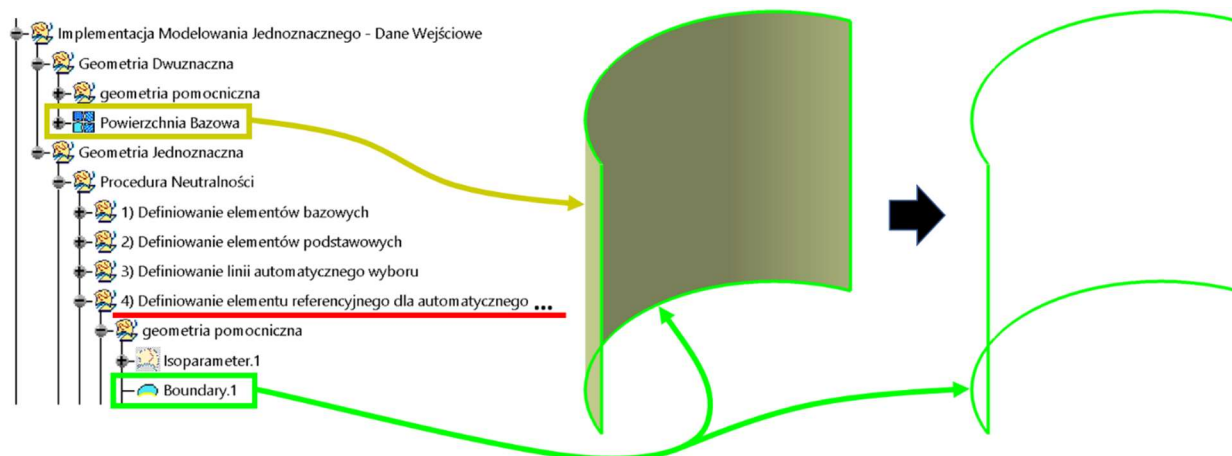
**Definiowanie elementu referencyjnego dla automatycznego wyboru zwrotu drugiej osi lokalnego układu współrzędnych** – polega na utworzeniu elementu referencyjnego *Far.2* na podstawie którego system CAD będzie dokonywał automatycznego wyboru geometrii spośród logicznego połączenia *Join.8* utworzonego w **Kroku 3**. Operacja *Far.2* jest utworzona na podstawie następującej geometrii:

- *Isoparameter.1* – krzywa izoparametryczna *Powierzchni Bazowej*, której pozycję wyznacza punkt środkowy *Point.8*, a jej kierunek linia *Line.6* (rys. 85).



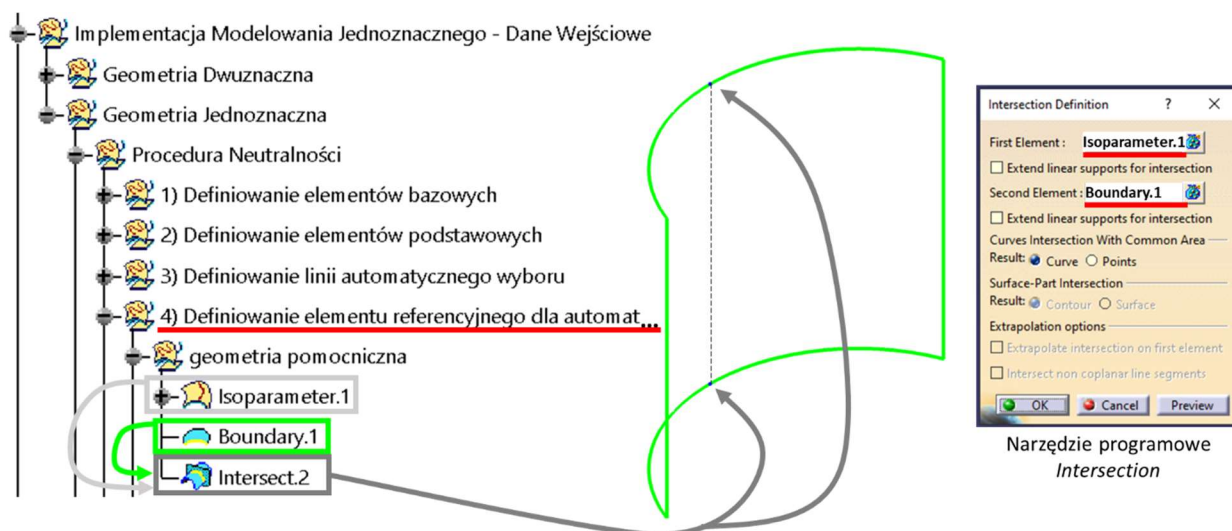
Rys. 85. Procedura Neutralności – tworzenie krzywej izoparametrycznej *Isoparameter.1*

- *Boundary.1* – krzywa graniczna *Powierzchni Bazowej* (rys. 86).



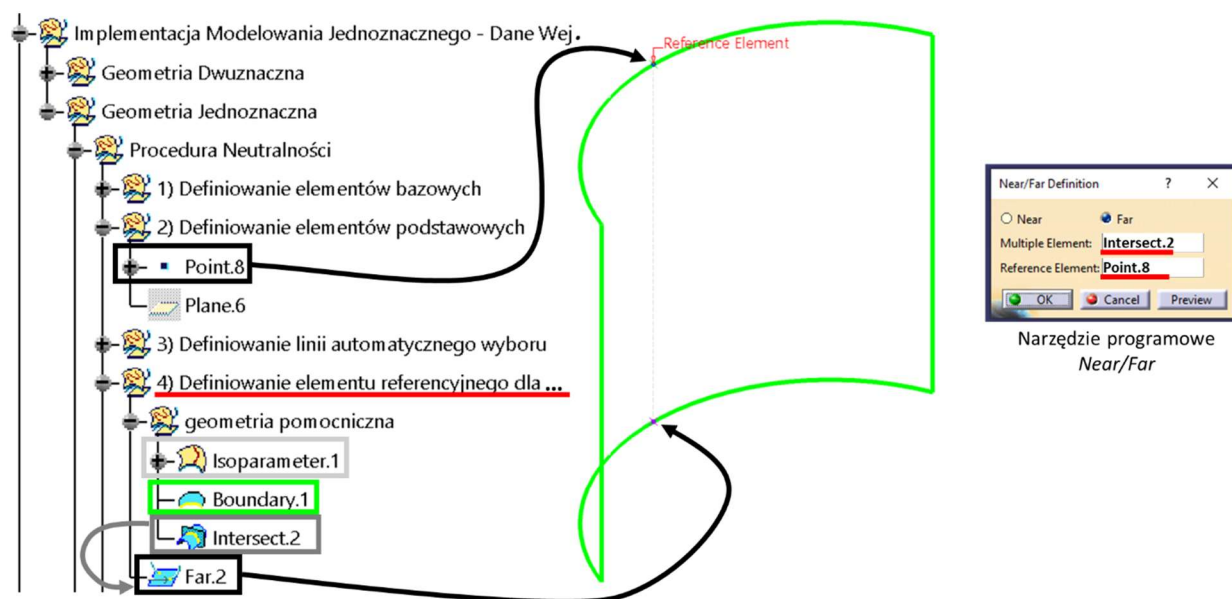
Rys. 86. Procedura Neutralności – tworzenie krzywej granicznej *Boundary.1*

- *Intersect.2* – punkty przecięcia krzywej izoparametrycznej *Isoparameter.1* z krzywą graniczną *Boundary.1*. W rezultacie generowane są dwa punkty przecięcia w formie jednej operacji modelowania, bo krzywa izoparametryczna przecina krzywą graniczną w dwóch miejscach (rys. 87).



Rys. 87. Procedura Neutralności – tworzenie dwóch punktów przecięcia *Intersect.2*

Element referencyjny *Far.2* powstaje w wyniku automatycznego wyboru przez system CAD punktu z logicznego połączenia *Intersect.2*, który znajduje się w dalszej odległości od punktu *Point.8* pełniącego w tej operacji rolę elementu referencyjnego (rys. 88). **Krok 4** Procedury Neutralności może wprowadzać u czytelnika zdezorientowanie, bo definiowany w nim element referencyjny dla lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* powstaje w oparciu o inny element referencyjny. Autor zwraca zatem uwagę, że następuje tutaj pewne zagnieżdżenie operacji modelowania o takiej samej funkcjonalności.



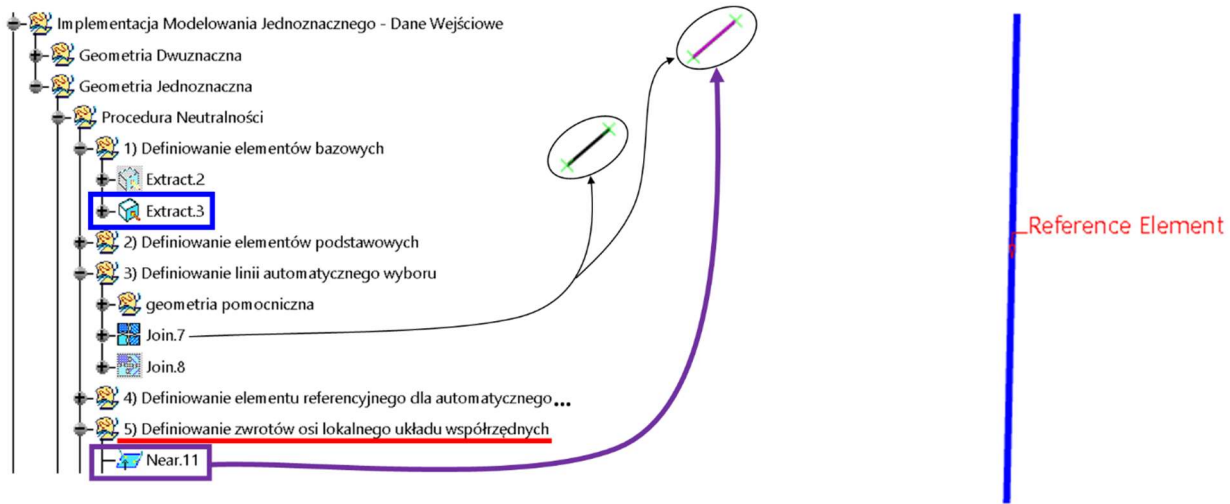
Rys. 88. Procedura Neutralności – definiowanie elementu referencyjnego *Far.2* dla automatycznego wyboru zwrotu drugiej osi lokalnego układu współrzędnych

#### Krok 5:

**Definiowanie zwrotów osi lokalnego układu współrzędnych** – polega na utworzeniu końcowej operacji *Axis System.7* Procedury Neutralności pełniącej rolę geometrycznie neutralnej operacji modelowania przeznaczonej do definiowania elementu referencyjnego w Procedurze Jednoznacznności. Zatem punkt początkowy lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* wyznacza punkt *Point.8*, a zwroty jego osi wyznaczone są

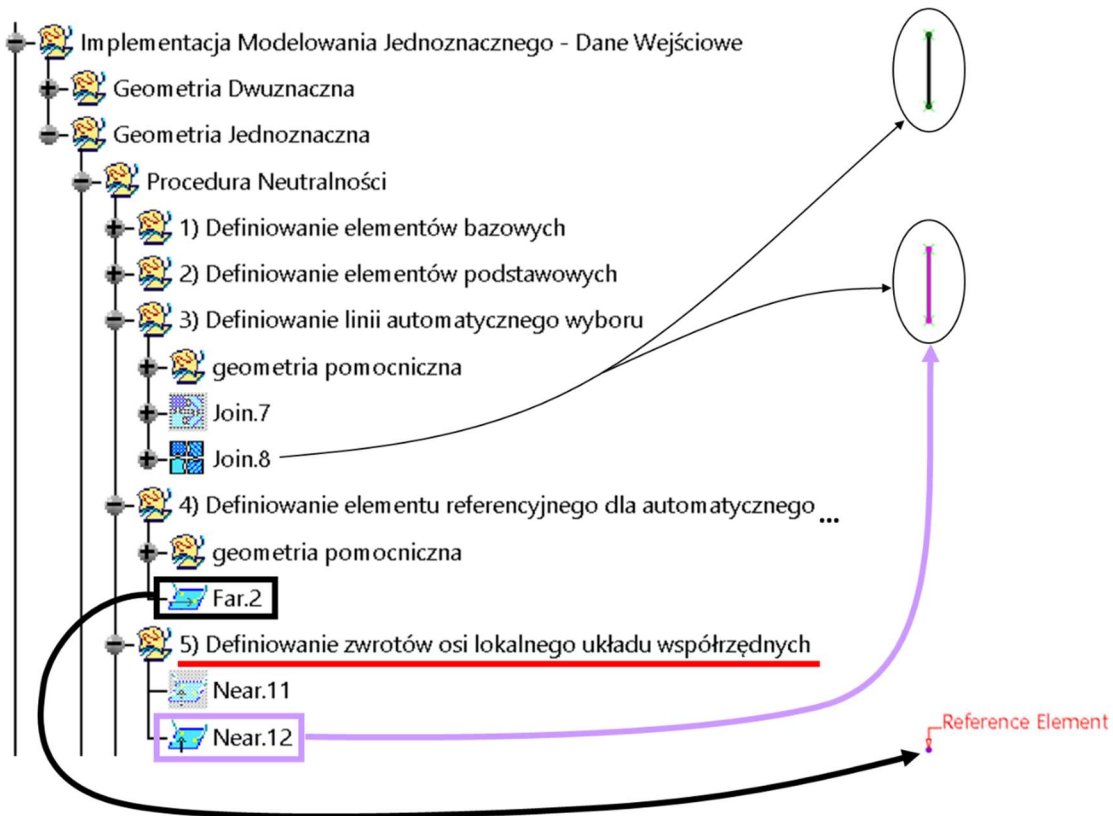
przy użyciu narzędzia programowego *Near/Far* generującego następujące operacje automatycznego wyboru przez system CAD geometrii spośród ich zbiorów logicznych:

- *Near.11* – linia logicznego połączenia *Join.7* leżąca bliżej elementu referencyjnego utworzonego w **Kroku 1** niniejszej procedury – *Extract.3*, definiująca oś X układu *Axis System.7* (rys. 89).



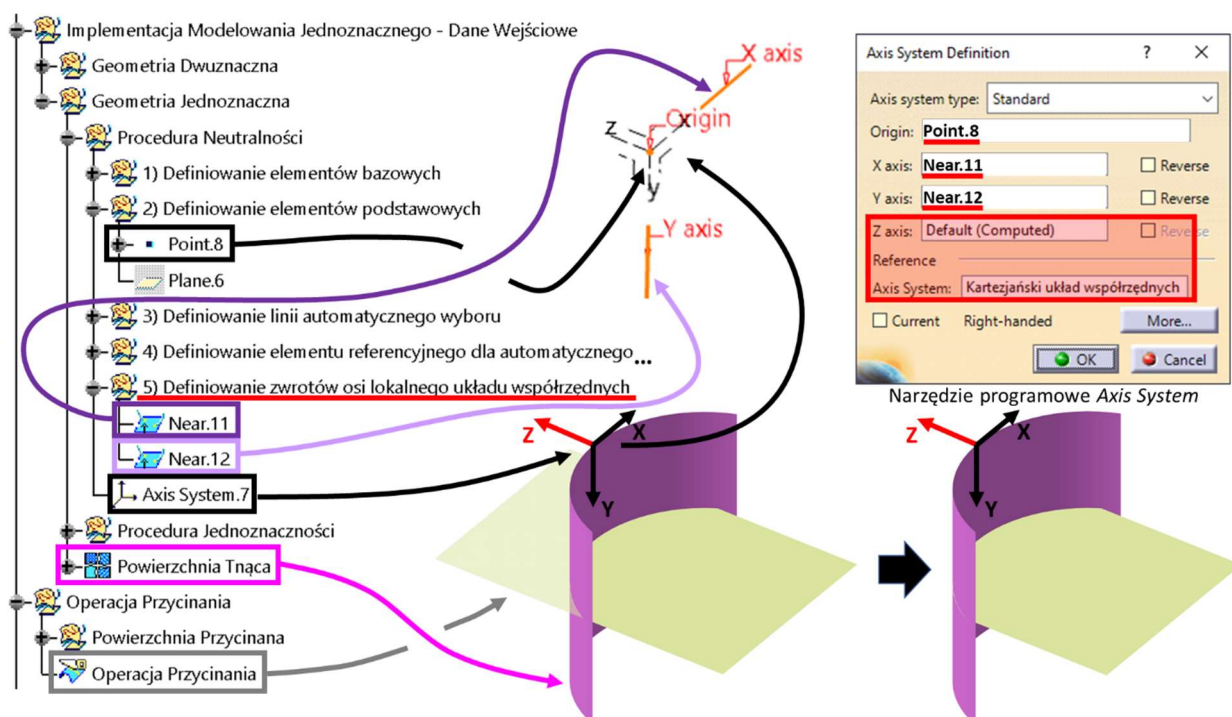
Rys. 89. Procedura Neutralności – automatyczny wybór przez system CAD linii leżącej bliżej elementu referencyjnego *Extract.3* (*Near.11*)

- *Near.12* – linia logicznego połączenia *Join.8* leżąca bliżej elementu referencyjnego utworzonego w **Kroku 4** niniejszej procedury – *Far.2*, definiująca oś Y układu *Axis System.7* (rys. 90).



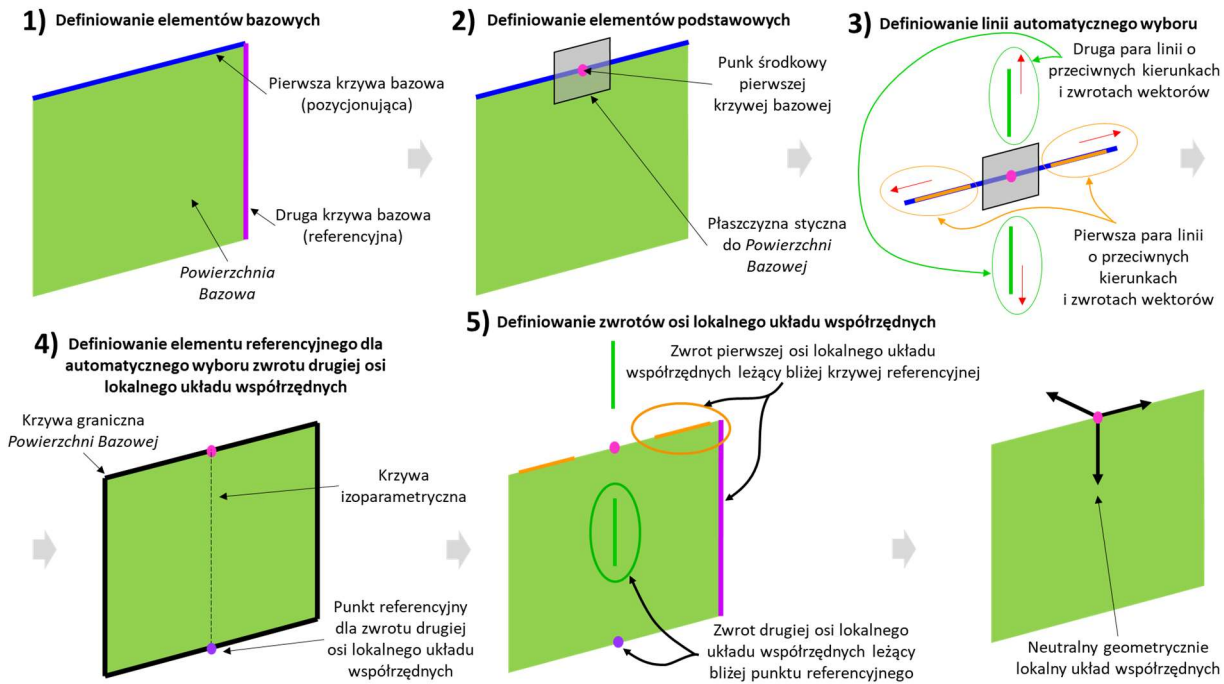
Rys. 90. Procedura Neutralności – automatyczny wybór przez system CAD linii leżącej bliżej elementu referencyjnego *Far.2* (*Near.12*)

W konsekwencji w oparciu o punkt *Point.8* zostaje wygenerowany lokalny układ współrzędnych *Axis System.7* o zdefiniowanych zwrotach dwóch jego osi X, Y i wynikowym zwrocie osi Z wynikającym z reguły prawej dłoni. W opisywanym przykładzie *Operacji Przyniania* oś Z wskazuje przycięty fragment powierzchni (rys. 91). Czytelnik zauważy zapewne, że narzędzie programowe definiujące układ *Axis System.7* w dalszym ciągu odnosi się do geometrii nie wchodzącej bezpośrednio w skład struktury geometrii jednoznaczej – *Kartezjańskiego układu współrzędnych*. Powodem tego jest niezdefiniowana przez autora oś Z nowego układu, przez co system CAD domyślnie stara się ją powiązać z bazowym elementem podstawowym jakim w każdym pliku CAD jest *Kartezjański układ współrzędnych*. Jednak w tym przypadku nie jest to istotne, bo ostatecznie pierwszeństwo przy interpretacji przez system CAD wynikowej osi Z ma reguła prawej dłoni.



Rys. 91. Procedura Neutralności – definiowanie zwrotów osi X i Y lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*; oś Z wskazuje przycięty fragment powierzchni

Powyższa Procedura Neutralności prowadząca do utworzenia lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* pełniącego rolę neutralnej operacji modelowania przeznaczonej do wyznaczenia elementu referencyjnego dla Procedury Jednoznacznosci została zilustrowana w uogólniony sposób na rysunku 92.



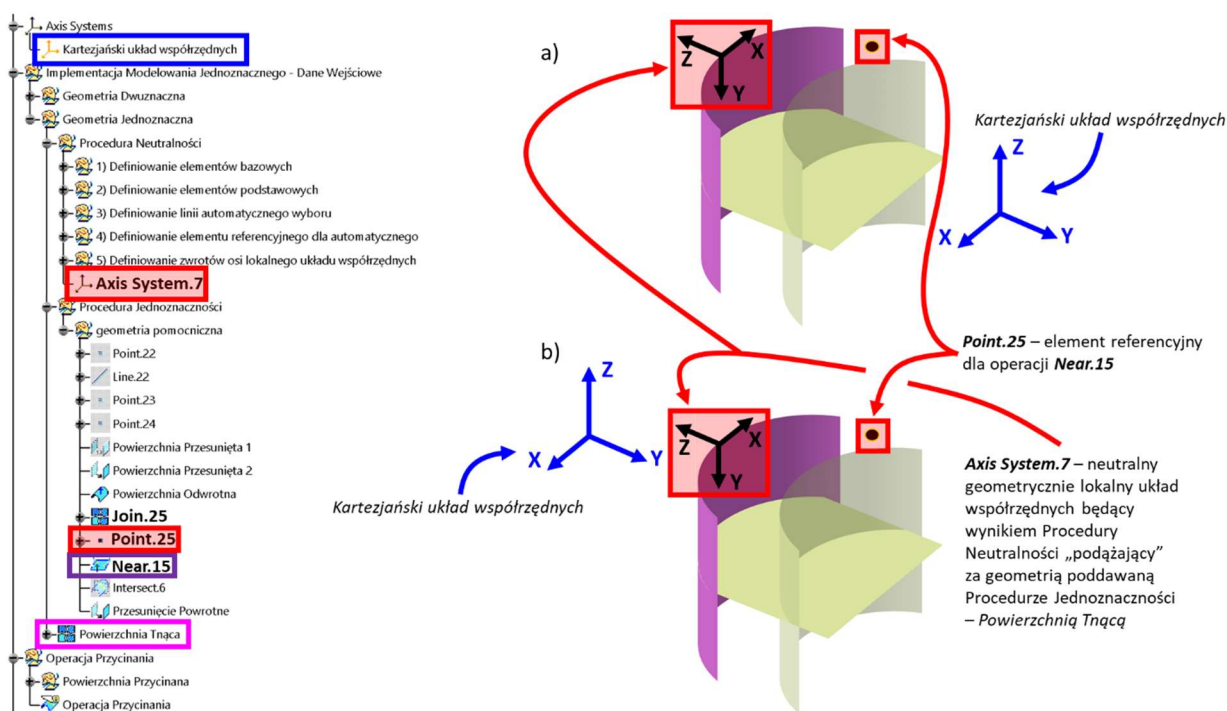
Rys. 92. Pięć Kroków **Procedury Neutralności (druga wytyczna Modelowania Jednoznacznego)**

O ile rysunek ten opisuje ją w sposób uniwersalny i stanowi jedną z dwóch, obok Procedury Jednoznacznosci, wytycznych Modelowania Jednoznacznego, o tyle poszczególne jej kroki nie muszą ściśle składać się z zaproponowanych przez autora operacji modelowania i przyjętych założeń tworzenia dzięki tym operacjom geometrii. Przykładowo, autor założył, że definiowane w **Kroku 1** i **Kroku 4** elementy referencyjne będą wyznaczały osie X i Y lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*, natomiast wynikową będzie oś Z. Jednak nic nie stoi na przeszkodzie, by założenie to zmienić tak, żeby osią wynikową była oś X lub Y. W podobny sposób można poprzez narzędzie programowe *Near/Far* zmienić definicję automatycznego wyboru przez system CAD geometrii z logicznych ich połączeń. Przykładowo, autor założył, że oś X lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* zawsze będzie zorientowana w stronę elementu referencyjnego (*Extract.3*), a oś Y tego układu zawsze będzie zorientowana w stronę *Powierzchni Bazowej*. W związku z tym atrybuty narzędzia programowego *Near/Far* w **Kroku 5** zostały zdefiniowane tak, by system CAD generował geometrię leżącą zawsze bliżej elementów referencyjnych *Extract.3* i *Far.2* (operacje *Near.11* i *Near.12*). Co więcej, realizacja Procedury Neutralności może odbywać się poprzez wykorzystanie innych niż zaproponowane narzędzi programowych. Na przykład zamiast tworzenia krzywej izoperymetrycznej *Powierzchni Bazowej* w **Kroku 4** można utworzyć płaszczyznę zorientowaną pod kątem  $90^\circ$  do płaszczyzny tworzonej w **Kroku 2**, a następnie przeciąć ją z krzywą graniczną *Powierzchni Bazowej* przy użyciu narzędzia programowego *Intersection* otrzymując tym samym dwa punkty przeznaczone do automatycznego wyboru operacji *Near/Far*. Autor pozostawia konstruktorowi w tej kwestii dowolność.

Integracja wytycznych Modelowania Jednoznacznego zmienia nieco przedstawioną w punkcie 4.2 niniejszego rozdziału Procedurę Jednoznacznosci dla opisywanej *Operacji Przycinania*. Elementem referencyjnym operacji *Near.15* automatycznego wyboru elementu spośród logicznie połączonej geometrii *Join.25* nie jest już płaszczyzna ZX lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*, lecz punkt *Point.25* oparty o ten układ, a w zasadzie punkt *Point.25*



oparty o operację neutralną w postaci lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*. Układ ten „podąża” bowiem za geometrią poddawaną procesowi jednoznaczności, zatem punkt oparty na nim zawsze spełnia kryteria wyboru konstruktora podczas definiowania operacji *Near/Far* (rys. 93).



Rys. 93. Zastosowanie wytycznych Modelowania Jednoznacznego – Procedury Jednoznaczności i Procedury Neutralności – do *Operacji Przycinania*, zapewniających zachowanie początkowego kryterium wyboru konstruktora definiującego część odcinaną tej operacji w przypadku, gdy: a) *Operacja Przycinania* zlokalizowana jest po jednej stronie *Kartezjańskiego układu współrzędnych*, b) *Operacja Przycinania* zlokalizowana jest po drugiej stronie *Kartezjańskiego układu współrzędnych*

W następnym punkcie niniejszego rozdziału zostały przedstawione badania nad implementacją Modelowania Jednoznacznego do topologii przykładowego modelu CAD – trzpienia pozycjonującego oraz wpływ tej techniki na jego transformacje geometryczne.

#### 4.4 Implementacja Modelowania Jednoznacznego do topologii modelu CAD

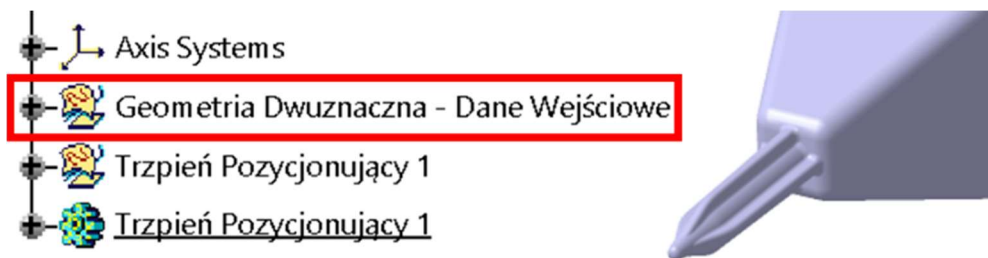
Badania autora nad implementacją Modelowania Jednoznacznego do topologii przykładowego modelu 3D polegały na wykonaniu serii transformacji geometrycznych tego modelu. Głównym celem tych badań było udowodnienie Tezy 1 i Tezy 2 sformułowanych na początku niniejszej rozprawy, według których:

**Teza 1:** Jednoznaczne zdefiniowanie orientacji danych wejściowych modelu CAD, jego podmiotu lub dowolnej jego operacji modelowania zapewnia stabilność topologiczną i geometryczną podczas jego transformacji geometrycznych.

**Teza 2:** Podmiana danych wejściowych modelu CAD, jego podmiotu lub dowolnej jego operacji modelowania w ramach przyjętych kryteriów wyboru może mieć bezpośredni wpływ na błędną interpretację przez system CAD jego topologii.

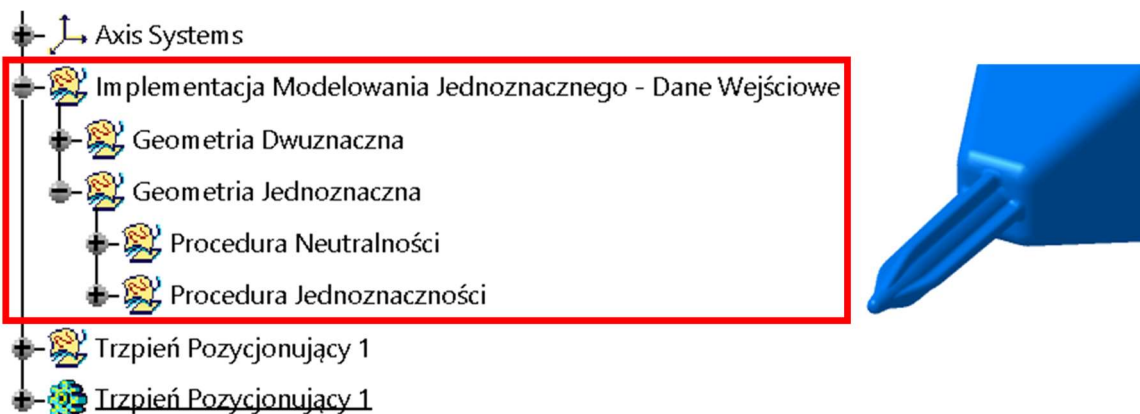
Autor przygotował więc dwie wersje modelu trzpienia pozycjonującego różniące się topologiami powierzchniowymi. Różnice te polegały na sposobie przygotowania danych wejściowych i formie

w jakiej występowały w drzewie struktury modelu. W Wersji I dane wejściowe występowały w formie geometrii dwuznacznej, dlatego też zostały zgrupowane w zestawie geometrycznym *Geometria Dwuznaczna – Dane Wejściowe* (rys. 94).



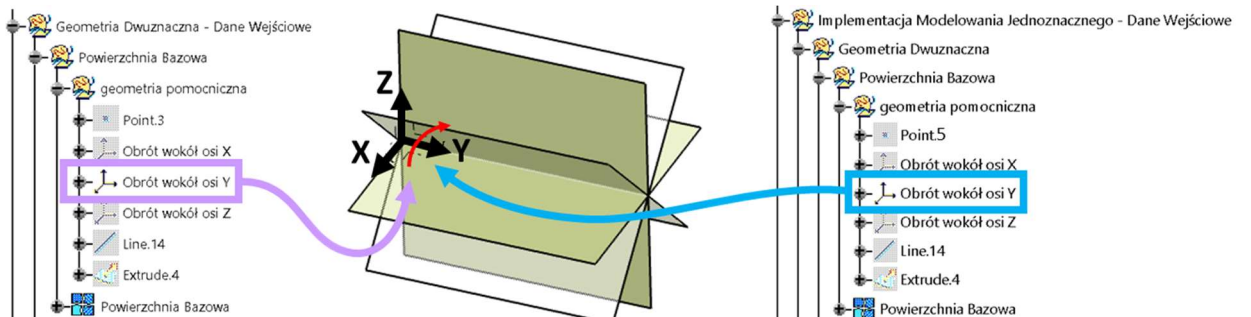
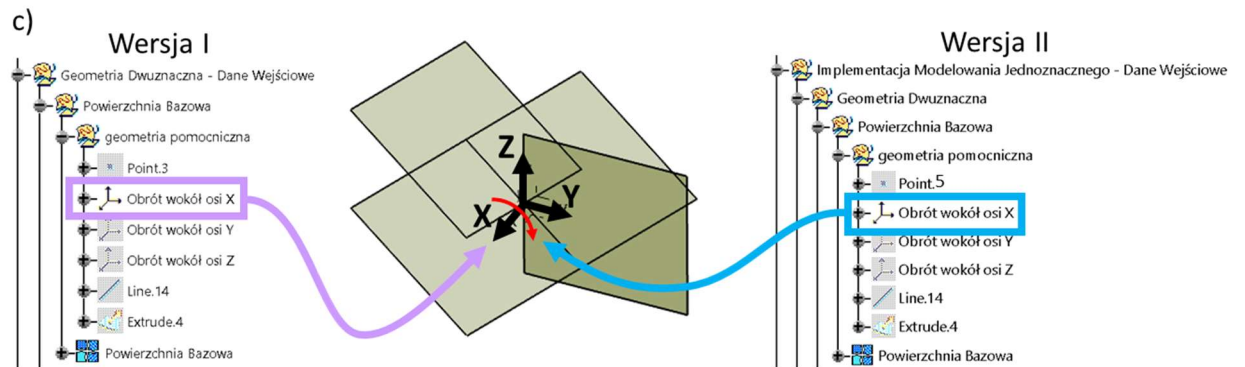
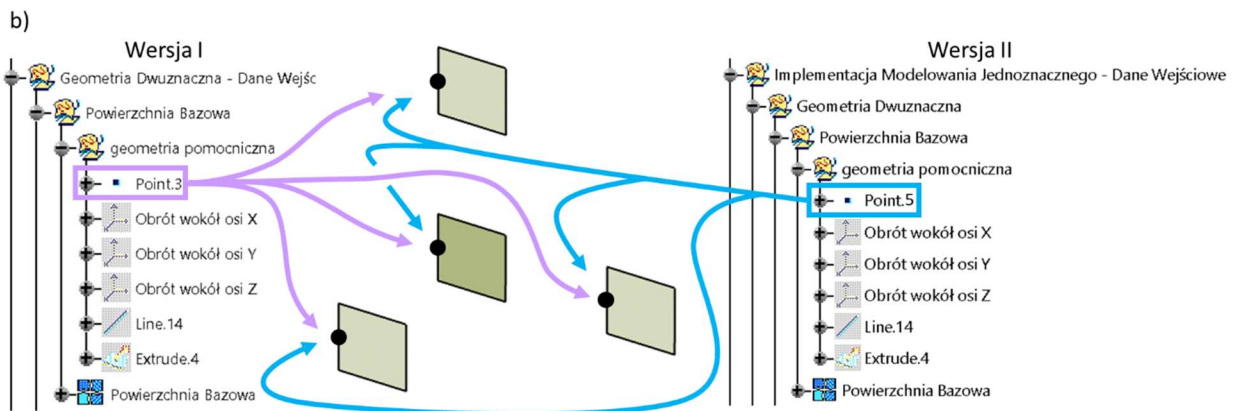
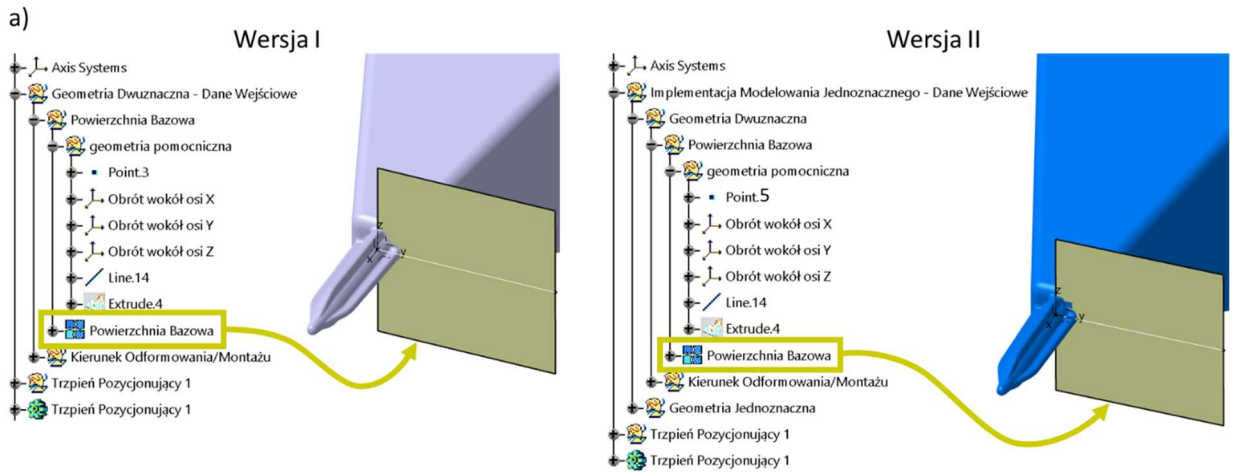
Rys. 94. Drzewo struktury trzpienia pozycjonującego w Wersji I

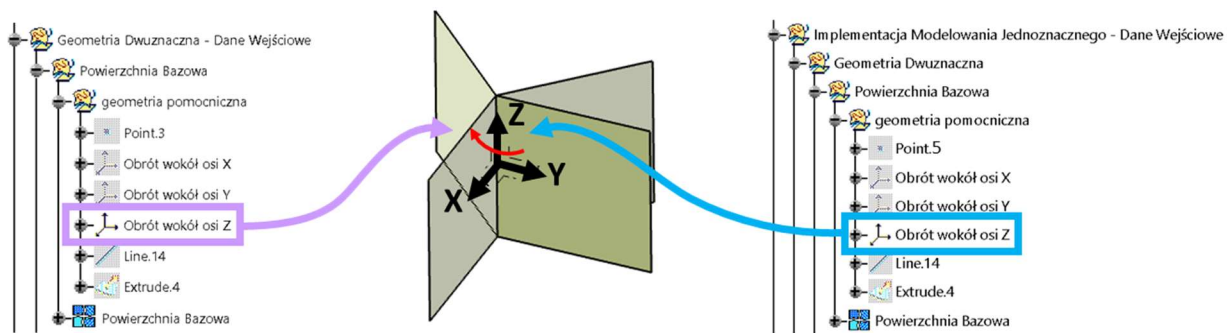
W Wersji II dane wejściowe reprezentowane były przez dwa zbiory: zbiór *Geometria Dwuznaczna*, będący odpowiednikiem zestawu w Wersji I trzpienia i zbiór *Geometria Jednoznaczna*, w którym autor zawarł opisaną w punktach 4.2 i 4.3 Rozdziału 4 Procedurę Neutralności i Procedurę Jednoznaczności. Proces implementacji Modelowania Jednoznacznego polega bowiem na ich „włączeniu” do topologii modelu 3D i niejako zastąpieniu standardowych danych wejściowych pod postacią geometrii dwuznacznej geometrią uzyskaną dzięki tym procedurom. Natomiast oba zbiory zostały dodatkowo skategoryzowane w ogólnym zestawie geometrycznym *Implementacja Modelowania Jednoznacznego – Dane Wejściowe* (rys. 95).



Rys. 95. Drzewo struktury trzpienia pozycjonującego w Wersji II

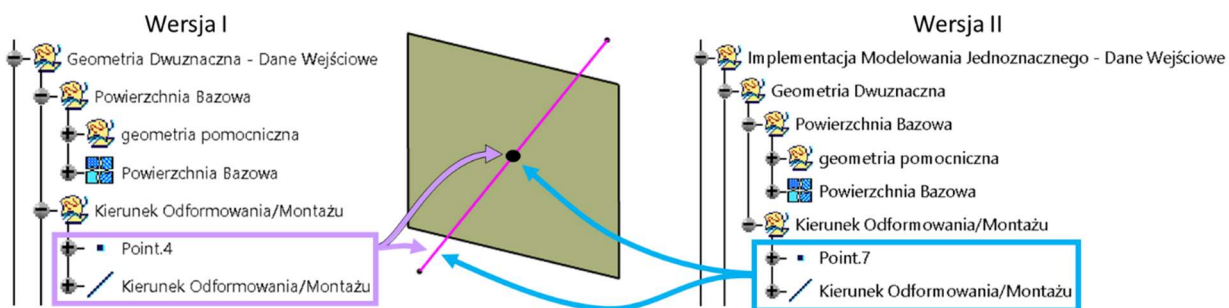
Tym samym Wersja I reprezentowała model CAD zbudowany przy użyciu Modelowania Hybrydowego, Modelowania w oparciu o Cechy Geometryczne, Modelowania Poziomego, Modelowania Wieloobiektowego i bez zaimplementowanego Modelowania Jednoznacznego, podczas gdy Wersja II reprezentowała model CAD zbudowany przy użyciu tych samych technik co w Wersji I, jednak dodatkowo z zaimplementowanym Modelowaniem Jednoznacznym. Celem ułatwienia przeprowadzania późniejszych transformacji trzpienia autor zdefiniował jego dane wejściowe w taki sposób, aby *Powierzchnia Bazowa* warunkowała jego pozycję i obrót (rys. 96a). Zatem *Powierzchnia Bazowa* została oparta na punkcie i trzech lokalnych układach współrzędnych pozwalających na dowolne przemieszczanie (rys. 96b) i obracanie jej względem osi tych układów (rys. 96c).





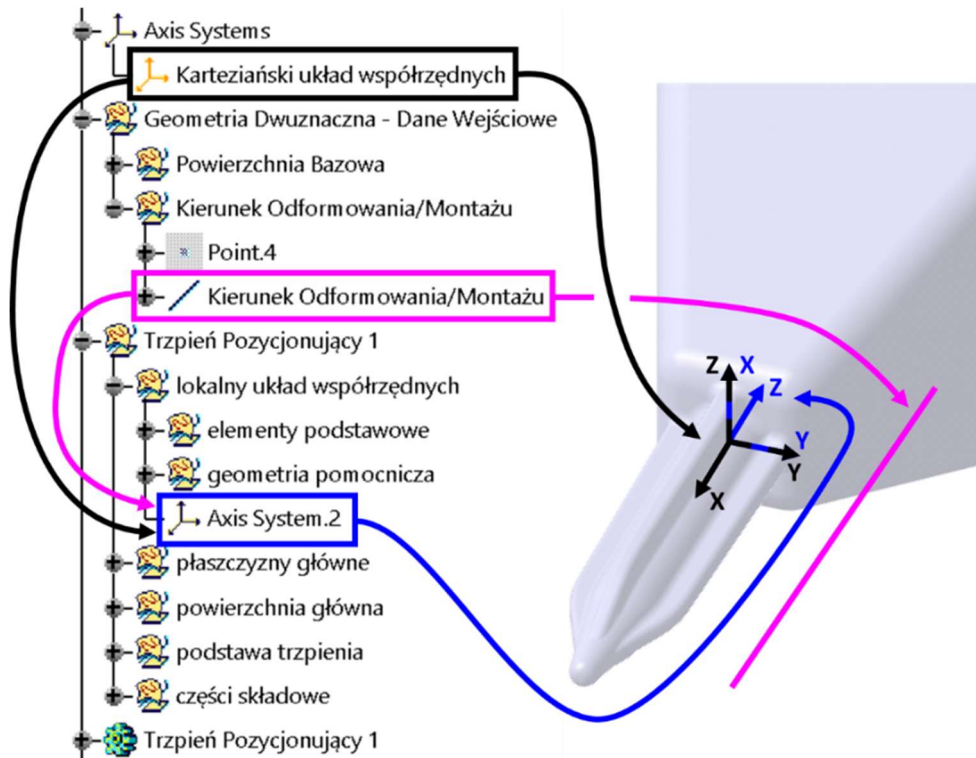
Rys. 96. *Powierzchnia Bazowa* Wersji I i Wersji II trzpienia pozycjonującego warunkująca pozycję i obrót podczas ich transformacji geometrycznych: a) *Powierzchnia Bazowa*, b) punkt definiujący pozycję *Powierzchni Bazowej*, c) lokalne układy współrzędnych definiujące obrót *Powierzchni Bazowej*

Natomiast *Kierunek Odformowania/Montażu* utworzono w formie linii normalnej do *Powierzchni Bazowej* w jej punkcie środkowym (rys. 97).

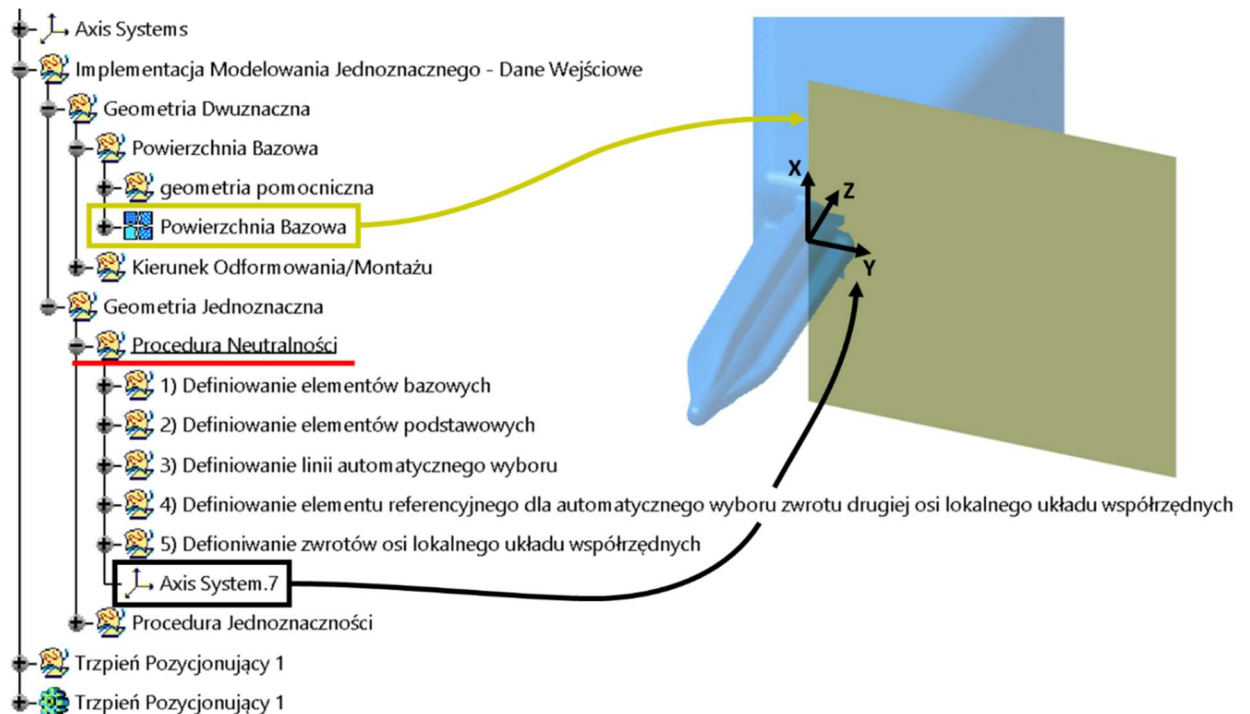


Rys. 97. *Kierunek Odformowania/Montażu* w formie linii normalnej do *Powierzchni Bazowej* w jej punkcie środkowym

Uzyskano więc asocjatywność między danymi wejściowymi, która jednak nie była wymagana do budowy trzpienia pozycjonującego oraz implementacji do jego topologii Modelowania Jednoznacznego. W praktycznym zastosowaniu dane wejściowe modelu 3D mogą występować niezależnie od siebie i bez dodatkowej geometrii nadrzędnej tworzącej te dane. W opisywanym przykładzie pierwszym elementem podstawowym obu wersji topologii powierzchniowej trzpienia pozycjonującego był lokalny układ współrzędnych. Na podstawie tego elementu została zbudowana zarówno jego topologia powierzchniowa jak i bryłowa. O ile w Wersji I trzpienia lokalny układ współrzędnych *Axis System.2* bazował na *Kierunku Odformowania/Montażu* oraz *Kartezjańskim układzie współrzędnych* (rys. 98), o tyle w Wersji II trzpienia lokalny układ współrzędnych (*Axis System.7*) został wygenerowany tylko w oparciu o geometrycznie dwuznaczną *Powierzchnię Bazową* i przy wykorzystaniu pierwszej wytycznej Modelowania Jednoznacznego – Procedury Neutralności (rys. 99).

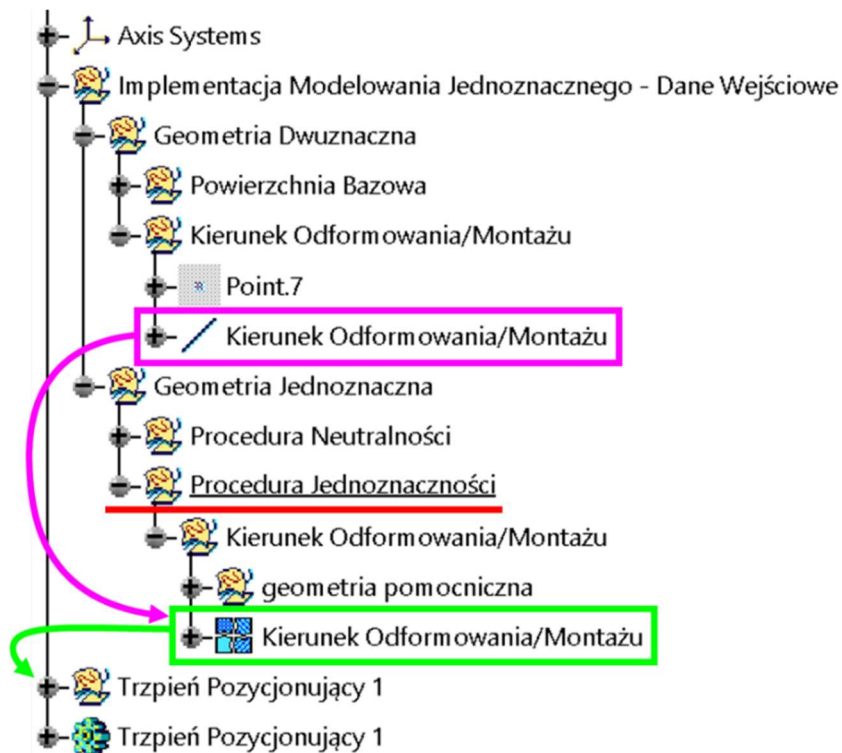


Rys. 98. Wersja I trzpienia pozycjonującego – lokalny układ współrzędnych *Axis System.2* zbudowany w oparciu o *Kierunek Odformowania/Montażu* i *Kartezjański układ współrzędnych*



Rys. 99. Wersja II trzpienia pozycjonującego – lokalny układ współrzędnych *Axis System.7* zbudowany w oparciu o geometrycznie dwuznaczną *Powierzchnię Bazową* i pierwszą wytyczną Modelowania Jednoznacznego – *Procedurę Neutralności*

Uzyskano w ten sposób jego niezależność w stosunku do *Kartezjańskiego układu współrzędnych* oraz niezmienną orientacyjną. Natomiast *Kierunek Odformowania/Montażu* w tej wersji trzpienia został poddany drugiej wytycznej Modelowania Poziomego – *Procedurze Jednoznacznego* i posłużył autorowi podczas tworzenia dalszej części jego topologii (rys. 100).



Rys. 100. Wersja II trzpieńa pozycjonującego – *Kierunek Odformowania/Montażu* poddany drugiej wytycznej Modelowania Poziomego – Procedurze Jednoznaczności

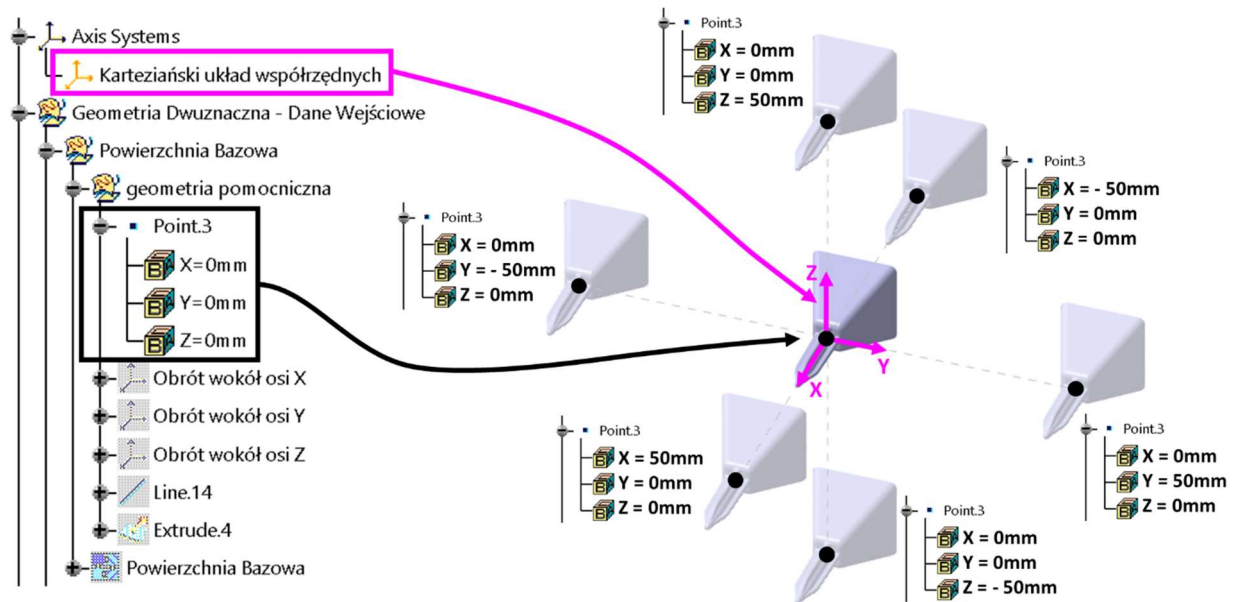
Należy w tym miejscu zwrócić uwagę, że sieć powiązań, czyli asocjatywność poszczególnych operacji drzewa struktury modelu 3D, kluczowa z punktu jego stabilności strukturalnej, nie wpływa na sposób implementacji do niego Modelowania Jednoznacznego. Oznacza to, że podstawową kwestią dla tej implementacji jest uzyskanie neutralności geometrycznej pierwszego elementu podstawowego w postaci lokalnego układu współrzędnych oraz jednoznaczności geometrycznej danych wejściowych biorących bezpośredni udział w generowaniu danego modelu, jego podmiotu lub dowolnej jego operacji modelowania. Ponieważ w opisywanym przykładzie *Powierzchnia Bazowa* nie została bezpośrednio wykorzystana do generowania topologii modelu 3D, nie było konieczności poddawania jej Procedurze Jednoznaczności.

Na obu wersjach trzpieńa pozycjonującego zostały przeprowadzone następujące transformacje geometryczne:

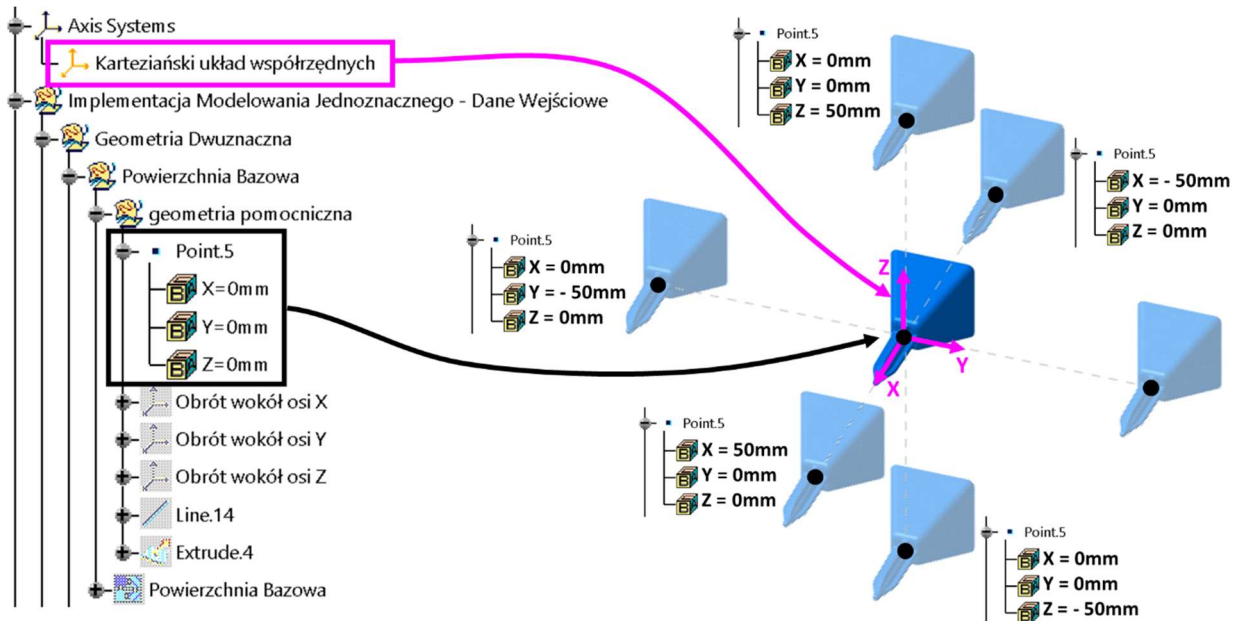
- 1) Zmiana lokalizacji modelu 3D wzdłuż głównych osi X, Y i Z *Kartezjańskiego układu współrzędnych* oraz w poszczególnych oktantach tego układu [17].
- 2) Obrót modelu 3D względem głównych osi X, Y i Z *Kartezjańskiego układu współrzędnych*.
- 3) Podmiana danych wejściowych modelu 3D.

**Transformacja 1:** Zmiana lokalizacji modelu 3D wzdłuż głównych osi X, Y i Z *Kartezjańskiego układu współrzędnych* oraz w poszczególnych oktantach tego układu (wyniki badań – patrz: Rozdz. 5, Tabela 3 i Tabela 4).

W pierwszej kolejności wykonano sześć prób przemieszczenia obu wersji trzpieńa wzdłuż osi X, Y i Z *Kartezjańskiego układu współrzędnych* w taki sposób, że bezwzględna wartość koordynaty punktu odpowiedzialnego za to przemieszczanie w danej osi tego układu była równa 50 mm, a jego znak zmieniał się w zależności od jego położenia względem punktu początkowego danej osi. Przemieszczenie to zrealizowano przez zmianę koordynat punktu *Point.3* dla Wersji I (rys. 101) i punktu *Point.5* dla Wersji II (rys. 102), na których oparto ich *Powierzchnie Bazowe*.

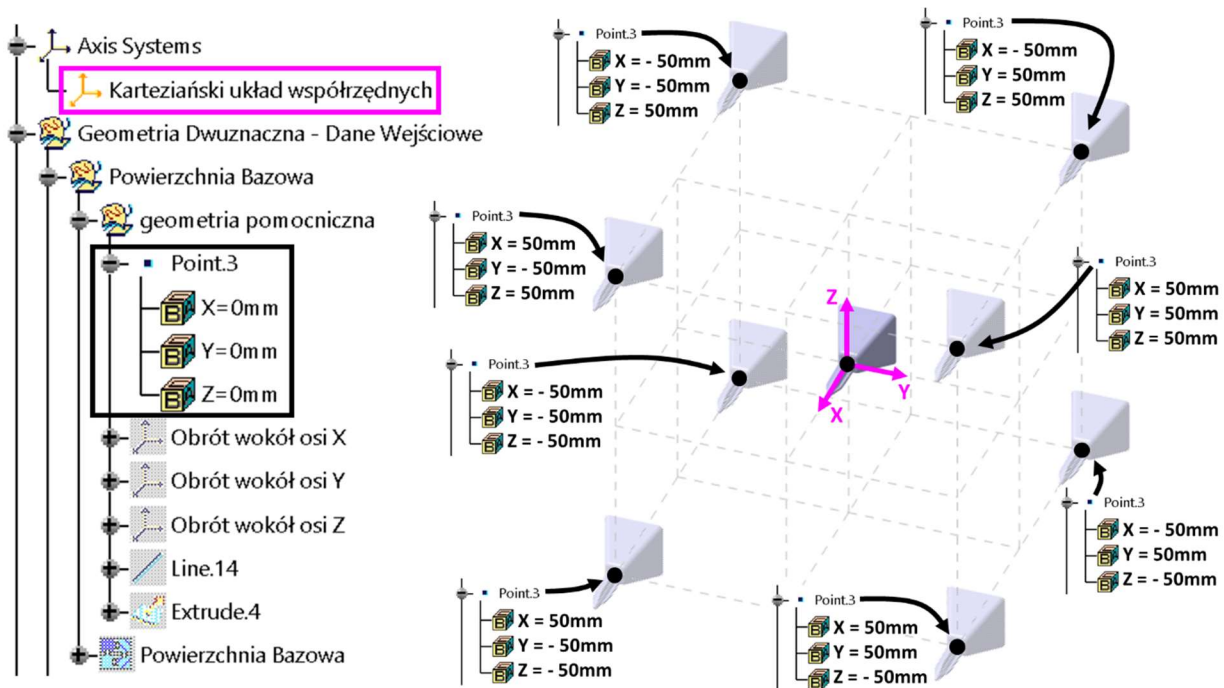


Rys. 101. Wersja I trzpienia pozycjonującego – zmiana jego lokalizacji wzdłuż głównych osi X, Y i Z Kartezjańskiego układu współrzędnych

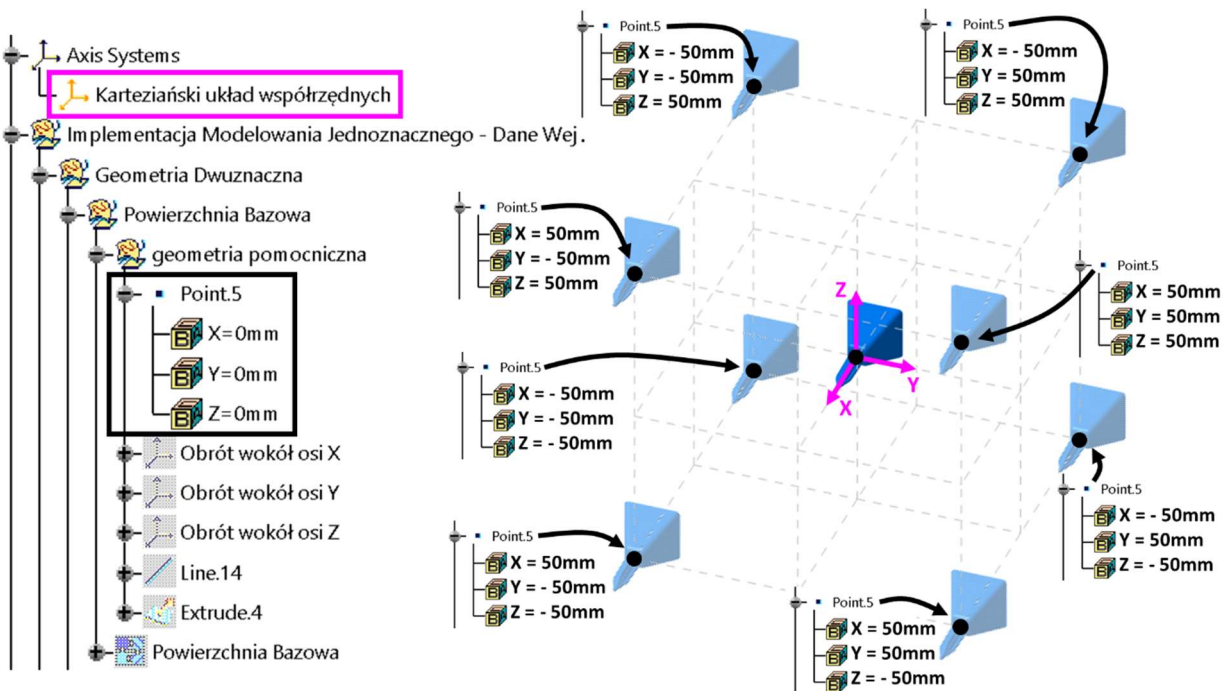


Rys. 102. Wersja II trzpienia pozycjonującego – zmiana jego lokalizacji wzdłuż głównych osi X, Y i Z Kartezjańskiego układu współrzędnych

W drugiej kolejności wykonano osiem prób przemieszczenia obu wersji trzpienia w każdym oktancie *Kartezjańskiego układu współrzędnych* w taki sposób, że bezwzględna wartość koordynat punktów *Point.3* i *Point.5* w każdej osi tego układu była równa 50 mm, a ich znak zmieniał się w zależności od położenia tych punktów w danym oktancie. Zrealizowane przemieszczenia ilustruje rysunek 103 dla Wersji I i rysunek 104 dla Wersji II.



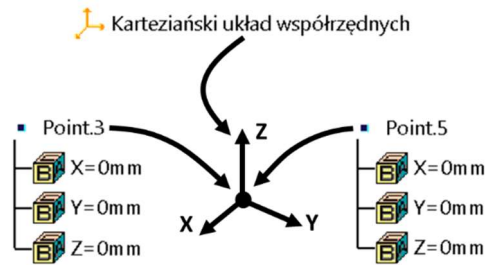
Rys. 103. Wersja I trzpienia pozycjonującego – zmiana jego lokalizacji w poszczególnych oktantach *Kartezjańskiego układu współrzędnych*



Rys. 104. Wersja II trzpienia pozycjonującego – zmiana jego lokalizacji w poszczególnych oktantach *Kartezjańskiego układu współrzędnych*

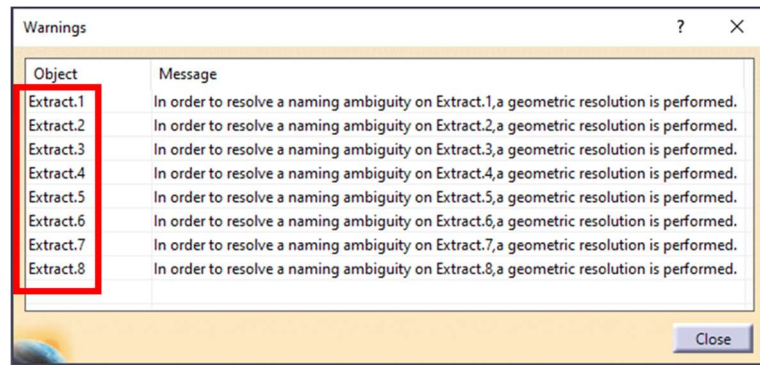
Ponieważ domyślne położenie punktów *Point.3* i *Point.5* było zgodne z początkiem *Kartezjańskiego układu współrzędnych*, to uzyskany efekt dla wszystkich przeprowadzonych prób dla Transformacji 1 można było rozpatrywać w kontekście zmiany lokalizacji trzpienia względem tego układu (rys. 105).





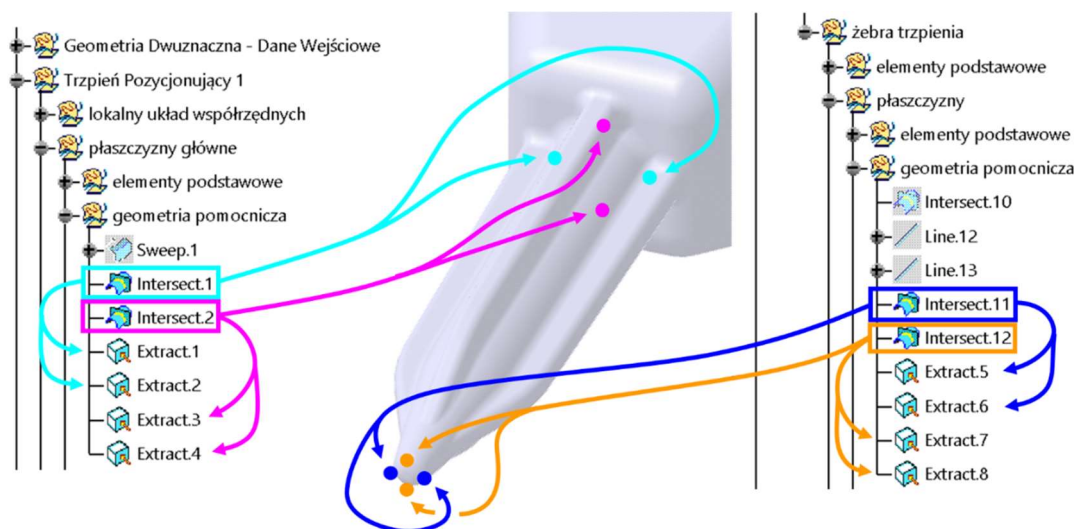
Rys. 105. Wersja I i II trzpienia pozycjonującego – domyślne położenie punktów *Point.3* i *Point.5* zgodne z początkiem *Kartezjańskiego układu współrzędnych*

Wszystkie próby przemieszczenia obu wersji trzpienia pozycjonującego zakończyły się wynikiem pozytywnym. Oznacza to, że zarówno Wersja I, jak i Wersja II nie wymagały od autora dodatkowej ingerencji w proces aktualizacji ich topologii. Jednak mimo pomyślnego ukończenia wszystkich prób dla Wersji I system CAD podczas jej aktualizacji wyświetlał komunikat o możliwości pojawienia się dwuznaczności geometrycznej dla ośmiu jej operacji modelowania – *Extract.1*, *Extract.2*, *Extract.3*, *Extract.4*, *Extract.5*, *Extract.6*, *Extract.7*, *Extract.8* (rys. 106).



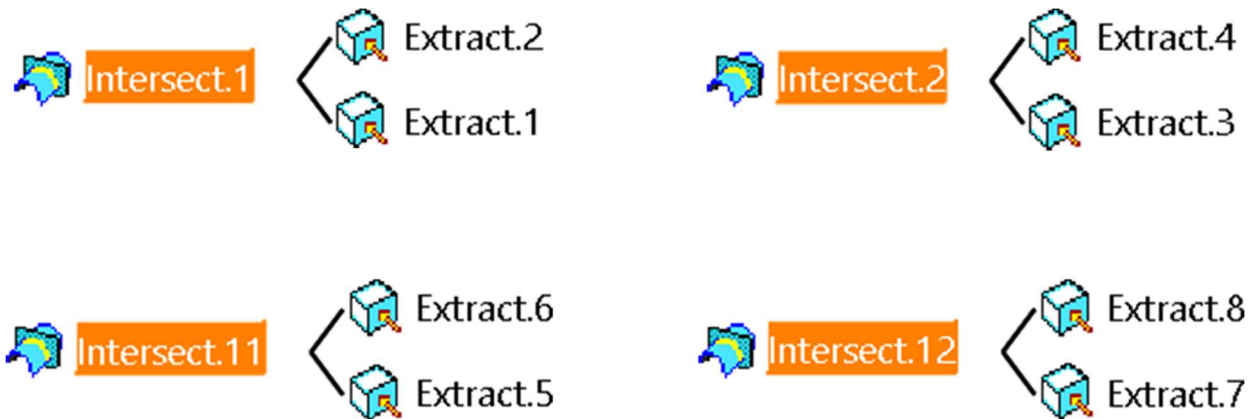
Rys. 106. Wersja I trzpienia pozycjonującego – komunikat związany z możliwością pojawienia się geometrycznej (imiennej) dwuznaczności

Komunikat ten wynikał z faktu, że owe osiem operacji w postaci pojedynczych punktów musiało być wyodrębnione z logicznie połączonych czterech par punktów *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12* (rys. 107).



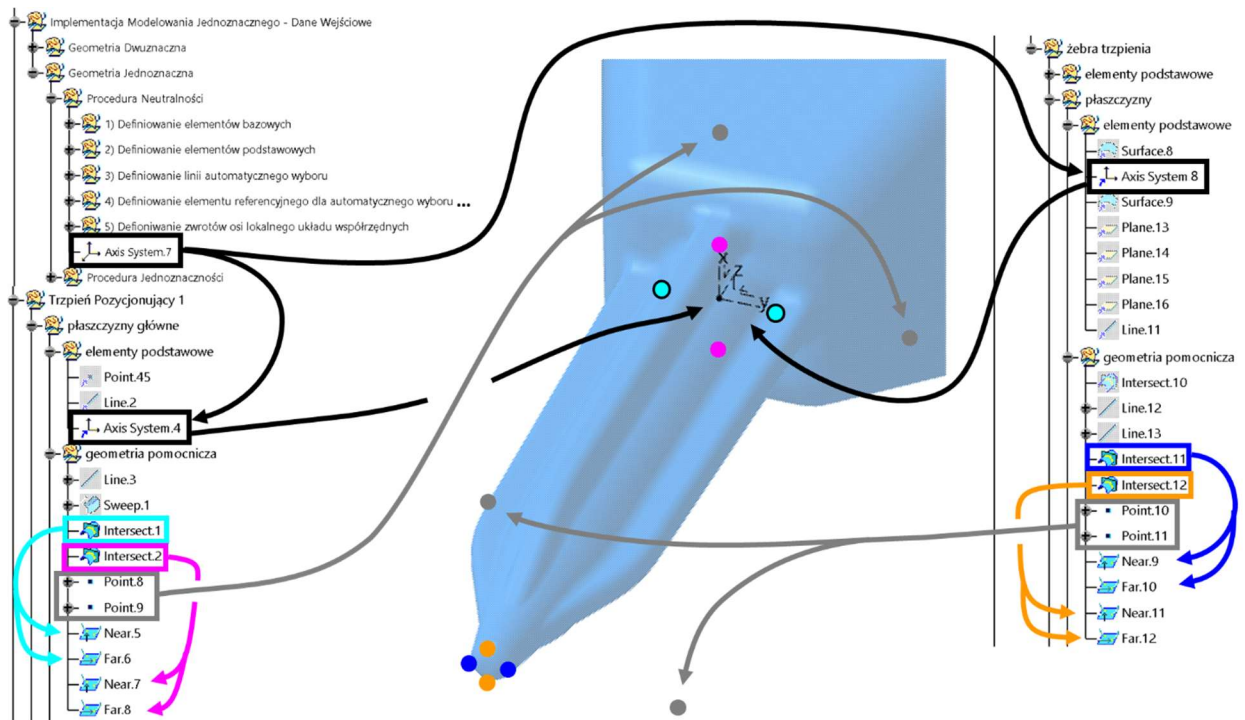
Rys. 107. Wersja I trzpienia pozycjonującego – logicznie połączone cztery pary punktów w postaci operacji *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12*

W sytuacji, gdy dwie geometrie są logicznie połączone w postaci jednej operacji modelowania, a operacja ta nie jest poddana dalszemu procesowi jednoznaczności, to każda geometria podrzędna temu logicznemu połączeniu może być interpretowana przez system CAD jako imienna dwuznaczność (ang. *naming ambiguity*). Dwie niepołączone „fizycznie” geometrie mają bowiem postać jednej operacji posiadającej jedną nazwę. Zatem podczas transformacji geometrycznej identyfikacja przez system CAD wyodrębnionych na podstawie takiego logicznego połączenia operacji nie odbywa się w sposób jednoznaczny z powodu braku rozróżnienia w nazwie geometrii nadrzędnej. Taka też sytuacja miała miejsce w rozpatrywanym przypadku (rys. 108).



Rys. 108. Osiem operacji modelowania: *Extract.1*, *Extract.2*, *Extract.3*, *Extract.4*, *Extract.5*, *Extract.6*, *Extract.7*, *Extract.8*, wyodrębnionych z logicznych połączeń, składających się z par punktów o tej samej nazwie (*Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12*)

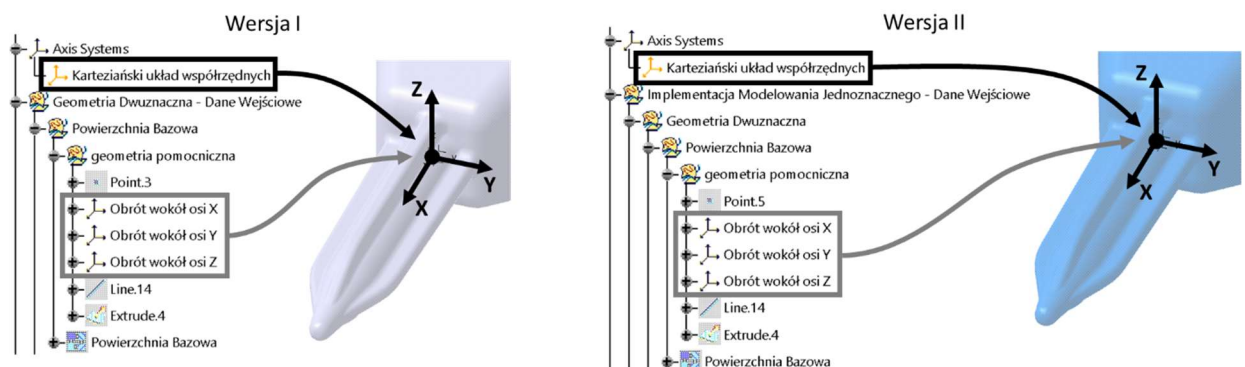
Oznacza to, że początkowo zdefiniowany przez użytkownika wybór nie musi być zachowany podczas transformacji danej geometrii, bo system CAD może zinterpretować go w sposób odwrotny lub wyświetlić dodatkowy błąd wynikający z utraty informacji na temat danych wejściowych dla tej geometrii. Komunikat o imiennej dwuznaczności nie wystąpił natomiast w Wersji II trzpienia pozycjonującego, w topologii którego dla tych samych logicznie połączonych czterech par punktów *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12* autor zaimplementował wytyczne Modelowania Jednoznacznego. Wykorzystując więc poddany wcześniej Procedurze Neutralności lokalny układ współrzędnych *Axis System.7* w formie asocjatywnych jego kopii *Axis System.4* i *Axis System.8* autor zdefiniował dwa punkty referencyjne *Point.8* i *Point.9* dla operacji *Intersect.1* i *Intersect.2* oraz dwa punkty referencyjne *Point.10* i *Point.11* dla operacji *Intersect.11* i *Intersect.12*. Dzięki zdefiniowanym punktom możliwe stało się jednoznaczne wyodrębnienie punktów z logicznych połączeń za pomocą narzędzia programowego *Near/Far* określając ich położenie w stosunku do utworzonych referencji (rys. 109). Nastąpiła zatem lokalna implementacja Modelowania Jednoznacznego do wybranych operacji modelowania.



Rys. 109. Wersja II trzpienia pozycjonującego – jednoznaczne wyodrębnienie punktów z logicznych połączeń *Intersect.1* i *Intersect.2* leżących bliżej (*Near.5*, *Near.7*) i dalej (*Far.6*, *Far.8*) punktów referencyjnych *Point.8* i *Point.9* oraz jednoznaczne wyodrębnienie punktów z logicznych połączeń *Intersect.11* i *Intersect.12* leżących bliżej (*Near.9*, *Near.11*) i dalej (*Far.10*, *Far.12*) punktów referencyjnych *Point.10* i *Point.11*

**Transformacja 2:** Obrót modelu 3D względem głównych osi X, Y i Z Kartezjańskiego układu współrzędnych (wyniki badań – patrz: Rozdz. 5, Tabela 5 i Tabela 6).

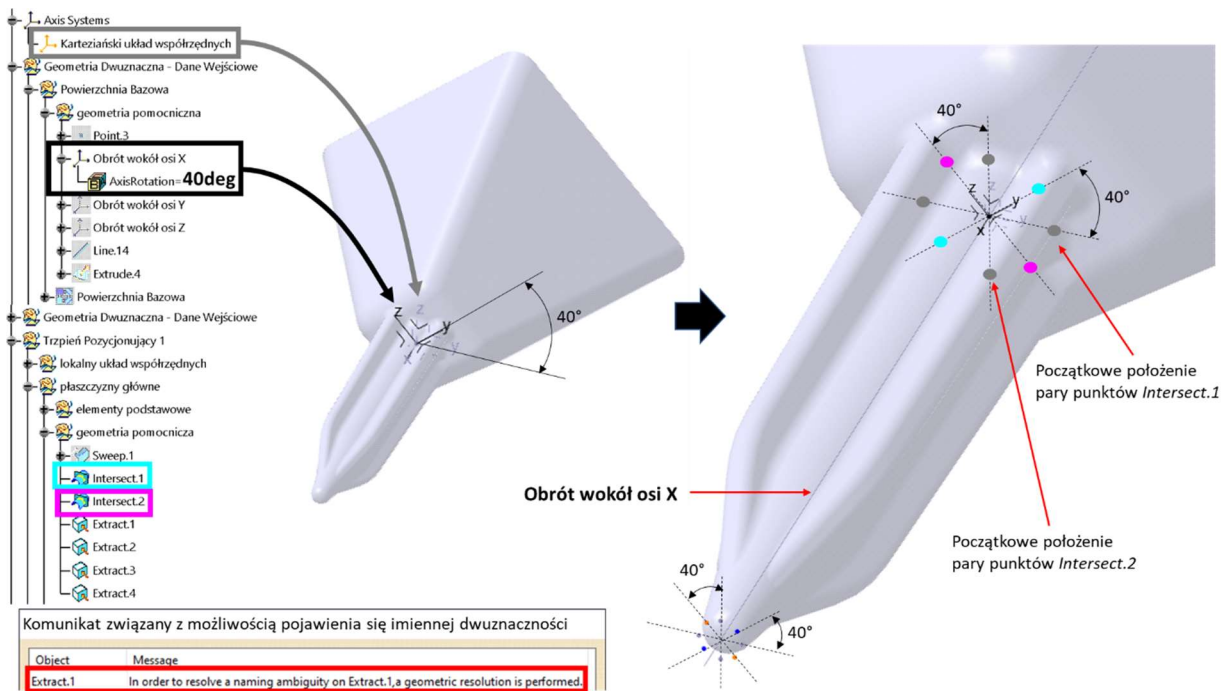
Obie wersje trzpienia zostały obrócone kolejno względem osi X, Y i Z odpowiednio w tym celu zdefiniowanych lokalnych układów współrzędnych (*Obrót wokół osi X*, *Obrót wokół osi Y*, *Obrót wokół osi Z*), za pomocą których określono wcześniej kierunek i obrót *Powierzchni Bazowej*, o następujące wartości:  $40^\circ$ ,  $160^\circ$ ,  $280^\circ$ . Ponieważ domyślny obrót  $0^\circ$  dla każdego lokalnego układu oznaczał zgodność osiową z *Kartezjańskim układem współrzędnych*, to uzyskany rezultat można było rozpatrywać w kontekście obrotu trzpienia wokół głównych osi tego układu (rys. 110).



Rys. 110. Zgodność osiowa między lokalnymi układami współrzędnych *Obrót wokół osi X*, *Obrót wokół osi Y*, *Obrót wokół osi Z*, a *Kartezjańskim układem współrzędnych* przy domyślnym ich obrocie równym  $0^\circ$

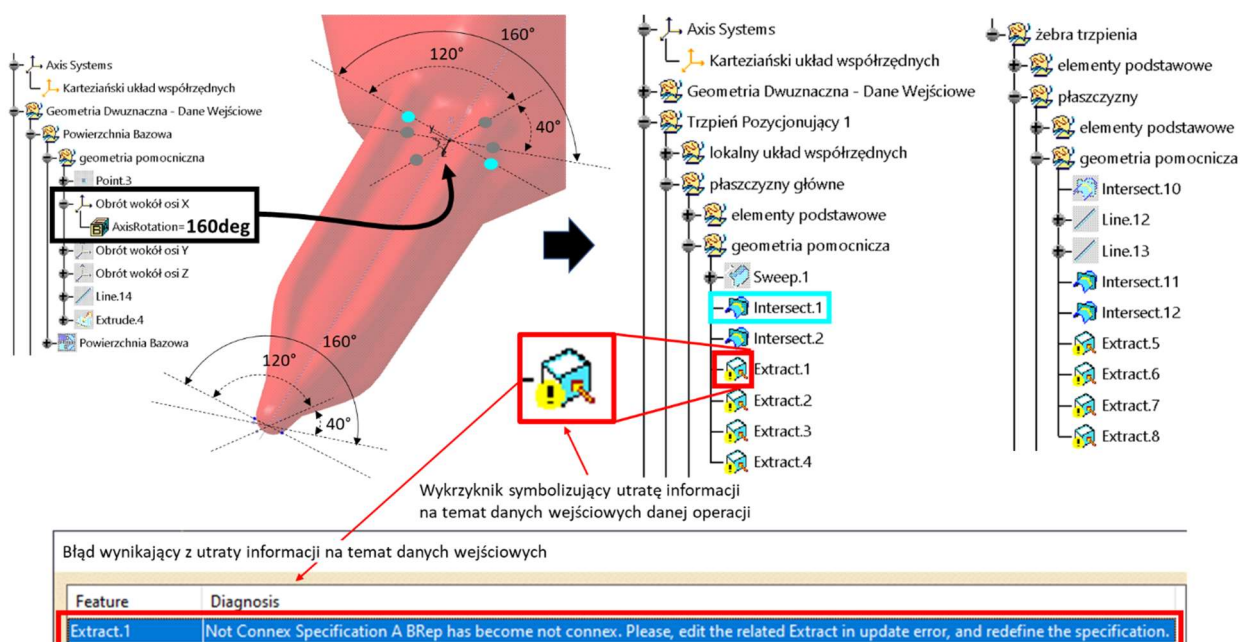
Na Transformację 2 złożyło się zatem dziewięć prób, przy czym trzy z nich – próba druga, piąta i ósma, zostały podzielone na dwa warianty, gdyż rezultat każdego z nich dla Wersji I trzpienia był inny.

Pierwsza próba obrotu Wersji I trzpienia o  $40^\circ$  względem osi X lokalnego układu współrzędnych *Obrót wokół osi X* zakończyła się takim samym pozytywnym wynikiem jak podczas Transformacji 1 – proces aktualizacji jego topologii nie wymagał od autora dodatkowej ingerencji, mimo że system CAD wyświetlał komunikat o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności dla ośmiu tych samych co dla Transformacji 1 operacji modelowania – *Extract.1*, *Extract.2*, *Extract.3*, *Extract.4*, *Extract.5*, *Extract.6*, *Extract.7*, *Extract.8* (rys. 111).



Rys. 111. Wersja I trzpienia pozycjonującego – obrót wokół osi X o  $40^\circ$  – komunikat związany z możliwością pojawienia się imiennej dwuznaczności

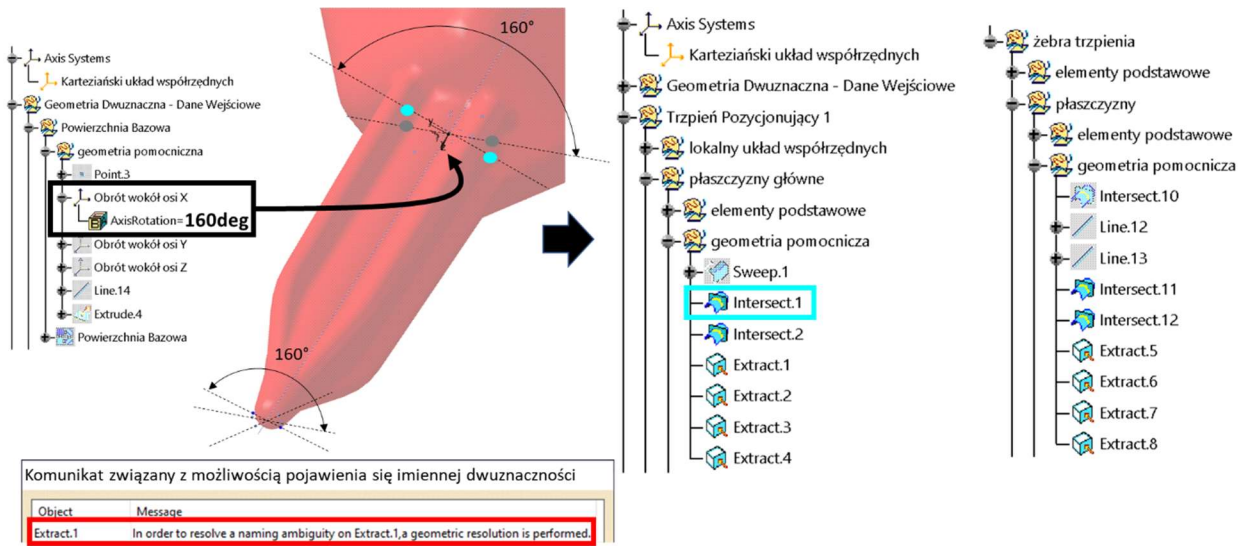
Dalszy jego obrót o kolejne  $120^\circ$  w próbie drugiej spowodował, że system CAD w związku z występującą w topologii imienną dwuznacznością logicznie połączonych par punktów *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12* utracił informację na temat danych wejściowych dla ich wyodrębnień (rys. 112).



Rys. 112. Wersja I trzpienia pozycjonującego – obrót wokół osi X o  $160^\circ$  ( $40^\circ + 120^\circ$ ) – utrata informacji na temat danych wejściowych dla wyodrębnień logicznie połączonych par punktów *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12*; czerwony kolor modelu 3D oznacza jego niezaktualizowaną topologię

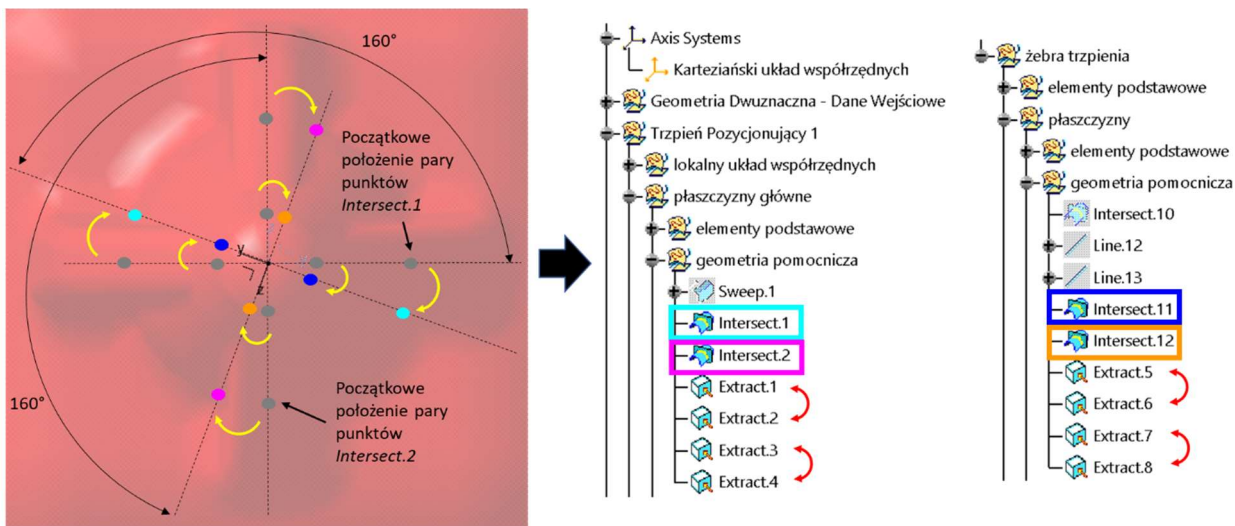
Zaistniała sytuacja wymagała ponownego wskazania przez autora wszystkich „zgubionych” punktów z logicznych połączeń dla poszczególnych wyodrębnień. Sytuacja ta jest jednocześnie najbardziej czasochłonnym etapem aktualizacji topologii modelu 3D, podczas którego konstruktor musi prześledzić wcześniejszą historię jego tworzenia i na nowo zdefiniować dane wejściowe niezinterpretowanych przez system CAD operacji modelowania. Dodatkowo, jeśli konstruktor nie jest twórcą aktualizowanego modelu, to proces ten wymaga od niego jeszcze większej uwagi i zapobiegania na bieżąco potencjalnych błędów interpretacyjnych każdej operacji modelowania z osobna, co w konsekwencji prowadzi do żmudnego analizowania drzewa struktury modelu 3D, podczas którego łatwo o pomyłkę.

Po negatywnym wyniku próby drugiej obrotu Wersji I trzpienia z wcześniejszej wartości  $40^\circ$  do wartości  $160^\circ$  względem osi X lokalnego układu współrzędnych *Obrót wokół osi X* autor przeprowadził drugi jej wariant, jednak tym razem z wartości początkowej, a więc  $0^\circ$ . Uzyskany w ten sposób rezultat różnił się od poprzedniego, ponieważ tym razem system CAD zinterpretował wszystkie wyodrębnienia, jednak w sposób odwrotny do zamierzonego wyświetlając, podobnie jak w poprzednich próbach, komunikat o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności (rys. 113).



Rys. 113. Wersja I trzpienia pozycjonującego – obrót wokół osi X o 160° – odwrotna interpretacja danych wejściowych przez system CAD wynikająca z pojawienia się imiennej dwuznaczności; czerwony kolor modelu 3D oznacza jego niezaktualizowaną topologię

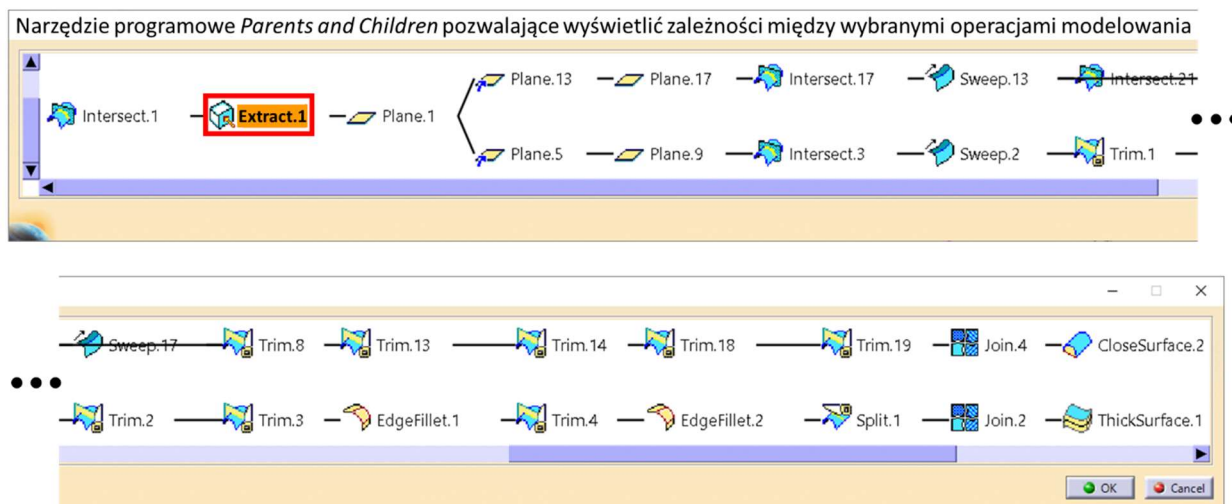
Powodem niepoprawnej interpretacji był fakt, że obrócone bezpośrednio z wartości 0° do 160° punkty w logicznych połączeniach zmieniły położenie zbliżając się do początkowego położenia swoich odpowiedników w danej parze (rys. 114). W konsekwencji system CAD zareagował tak jak w przypadku pierwszej próby obrotu, w której różnica w położeniu poszczególnych par punktów była na tyle mała, że system odnalazł ich nową pozycję i poprawnie przypisał je jako dane wejściowe do poszczególnych wyodrębnień. Jednak w tym przypadku dla wszystkich logicznych połączeń przypisanie to było nieprawidłowe, bo zbliżone z początkowymi nowe pozycje punktów nie były pozycjami tych samych punktów, a ich odpowiedników w danym logicznym połączeniu.



Rys. 114. Wersja I trzpienia pozycjonującego – obrót wokół osi X o 160° – błędna interpretacja punktów leżących w bliskiej odległości ich odpowiedników w logicznie połączonych parach punktów *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12* przez system CAD; czerwony kolor modelu 3D oznacza jego niezaktualizowaną topologię

Biorąc pod uwagę fakt, że wyodrębniona geometria stanowiła podstawę topologiczną dla później utworzonych operacji, drugi wariant próby drugiej obrotu Wersji I trzpienia spowodował większą

liczbę błędów strukturalnych, bo system nie zatrzymał procesu aktualizacji na pierwszej nieprawidłowo zinterpretowanej operacji i kontynuował go aż do momentu napotkania błędów uniemożliwiających wygenerowanie samej geometrii modelu 3D. Wynikiem tego nastąpiła błędna interpretacja w każdej następnej operacji modelowania powiązanej w sposób bezpośredni lub pośredni z omawianymi wyodrębnieniami (rys. 115).

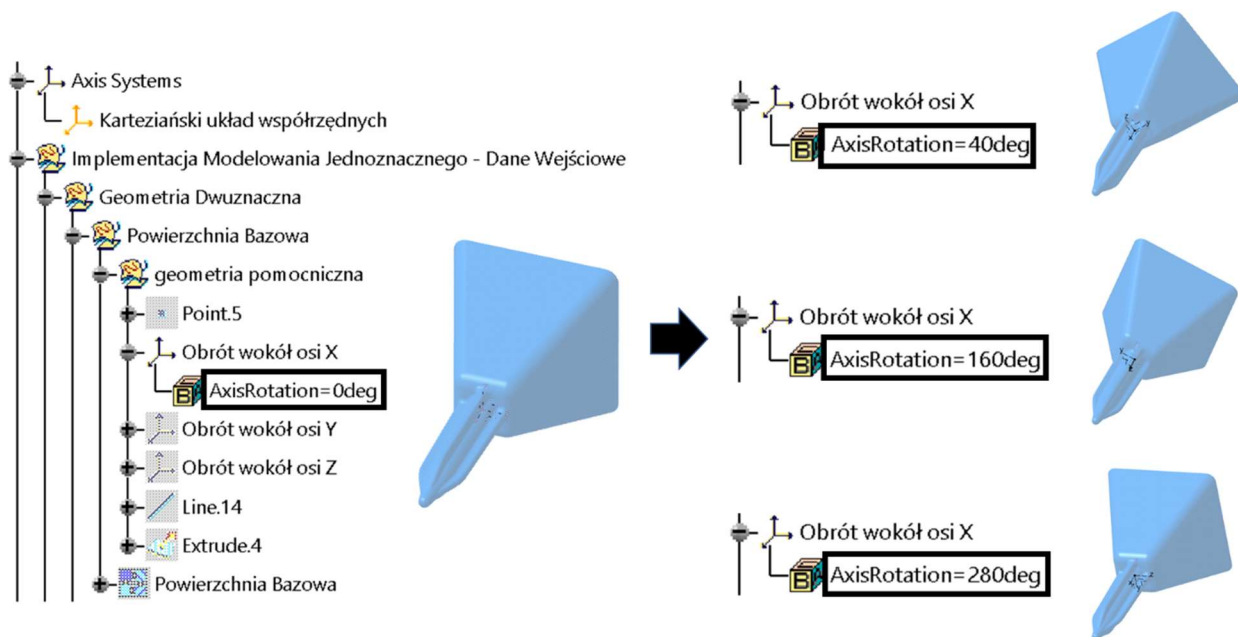


Rys. 115. Wersja I trzpienia pozycjonującego – przykładowa sieć powiązań wyodrębnionego punktu *Extract.1* mającego bezpośredni lub pośredni wpływ na każdą podrzędną mu operację modelowania tej sieci

Zaistniała sytuacja, w której błędna interpretacja danej operacji modelowania przez system CAD nie powoduje natychmiastowego zatrzymania procesu aktualizacji modelu 3D jest bardziej niekorzystna od utraty informacji na temat ich danych wejściowych, a tym samym zatrzymania tego procesu na pierwszym napotkanym błędzie, bo konstruktor w pierwszej kolejności musi odszukać w drzewie struktury modelu 3D przyczyny powstałych licznych nieprawidłowości nie dających jednak, do pewnego momentu, żadnej informacji zwrotnej. Zatem oba warianty próby drugiej obrotu Wersji I trzpienia pozycjonującego o  $160^\circ$  względem osi X lokalnego układu współrzędnych *Obrót wokół osi X* zakończyły się wynikiem negatywnym, bo wymagały od autora ingerencji w proces aktualizacji jego topologii.

Negatywnym wynikiem zakończyła się również trzecia próba obrotu tej wersji trzpienia względem osi X lokalnego układu współrzędnych *Obrót wokół osi X* o  $280^\circ$  – w związku z występującą w topologii imienną dwuznacznością logicznie połączonych par punktów *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12* system CAD utracił informację na temat danych wejściowych dla ich wyodrębnień. Zatem zaistniała potrzeba ponownego wskazania wszystkich „zgubionych” punktów z logicznych połączeń dla poszczególnych wyodrębnień.

Żaden z opisanych wyżej błędów ani komunikatów nie wystąpił natomiast podczas prób obrotu Wersji II trzpienia pozycjonującego względem tej samej osi X (rys. 116).

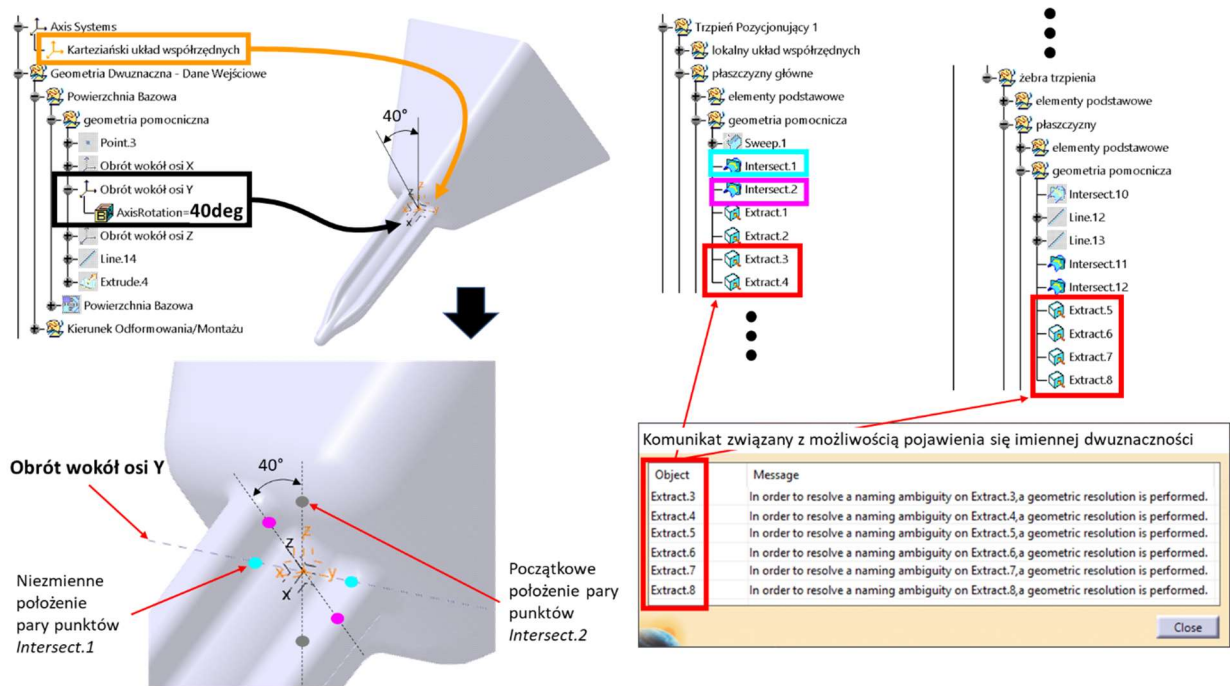


Rys. 116. Wersja II trzpienia pozycjonującego – wszystkie próby jego obrotu wokół osi X zakończone wynikiem pozytywnym

Dzięki zastosowaniu Procedury Neutralności Modelowania Jednoznacznego dla lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* oraz narzędzia programowego *Near/Far* umożliwiającego automatyczny wybór geometrii przez system CAD uzależniony od jej położenia w stosunku do innej geometrii (rys. 109), proces aktualizacji topologii trzpienia po każdej zmianie wartości kątowej jego obrotu nie wymagał od autora ingerencji i przebiegał bezzwłocznie.

W ramach czwartej próby autor rozpoczął przeprowadzanie obrotu obu wersji trzpienia pozycjonującego względem osi Y lokalnego układu współrzędnych *Obrót wokół osi Y*. Obrót Wersji I trzpienia o  $40^\circ$  zakończył się podobnym rezultatem jak podczas jego obrotu o tę samą wartość względem osi X w próbie pierwszej – proces aktualizacji jego topologii nie wymagał od autora dodatkowej ingerencji, a system CAD wyświetlał komunikat związany z możliwością pojawienia się imiennej dwuznaczności dla wyodrębnionych z logicznych połączeń punktów – jednak nie dla wszystkich. Ponieważ logiczne połączenie *Interesect.1* było przecięciem powierzchni cylindrycznej *Sweep.1* i osi Y lokalnego układu współrzędnych, a więc osi obrotu tej serii prób, wyodrębnione z niego punkty, zarówno w tej, jak i w kolejnych próbach związanych z obrotem trzpienia wokół osi Y, nie zmieniały swojego położenia. Zatem system za każdym razem poprawnie interpretował ich nowe, a tak naprawdę te same, położenie w trakcie procesu aktualizacji topologii trzpienia – bez wyświetlania dodatkowego komunikatu (rys. 117). Pomimo występującego komunikatu związanego z możliwością pojawienia się imiennej dwuznaczności, autor zakwalifikował wynik próby czwartej dla Wersji I trzpienia jako pozytywny, bo proces aktualizacji topologii modelu 3D przebiegał bez konieczności dodatkowej ingerencji.

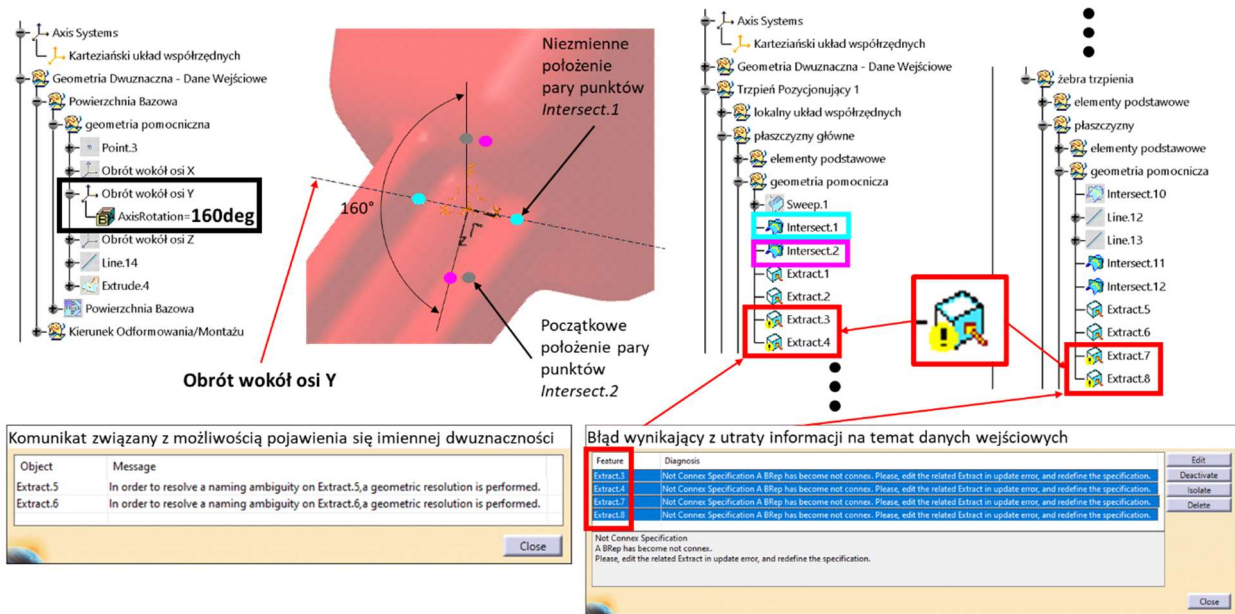




Rys. 117. Wersja I trzpieńa pozycjonującego – obrót wokół osi Y o 40° – komunikat związany z możliwością pojawienia się imiennej dwuznaczności dla części wyodrębnień z logicznych połączeń par punktów

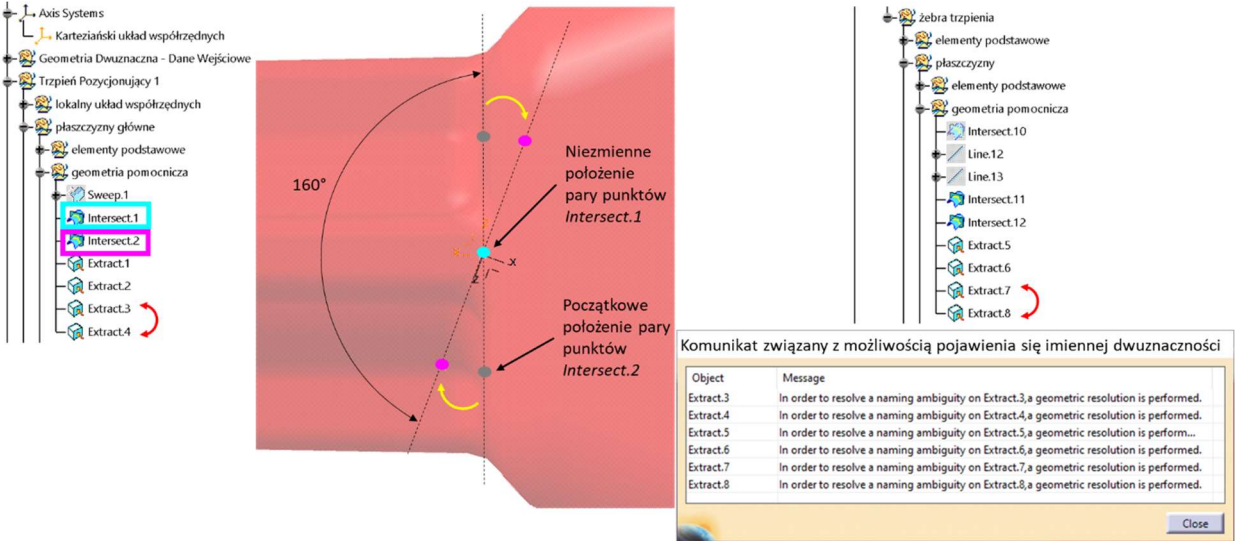
Obrotu Wersji I trzpieńa o 160° ponownie dokonano dwukrotnie w próbie piątej: z wartości poprzedniej, czyli 40° oraz z wartości początkowej, czyli 0° otrzymując podobne jak w próbie drugiej rezultaty:

- W wariancie pierwszym system CAD poprawnie zidentyfikował wyodrębnione punkty z operacji *Intersect.1* i *Intersect.11*. Dodatkowo, dla punktów *Extract.5* i *Extract.6* wystąpił komunikat związany z możliwością pojawienia się imiennej dwuznaczności. Dla wyodrębnień z operacji *Intersect.2* i *Intersect.12* nastąpiło wyświetlenie błędu wynikającego z utraty danych wejściowych i przerwanie procesu aktualizacji topologii modelu 3D (rys. 118).



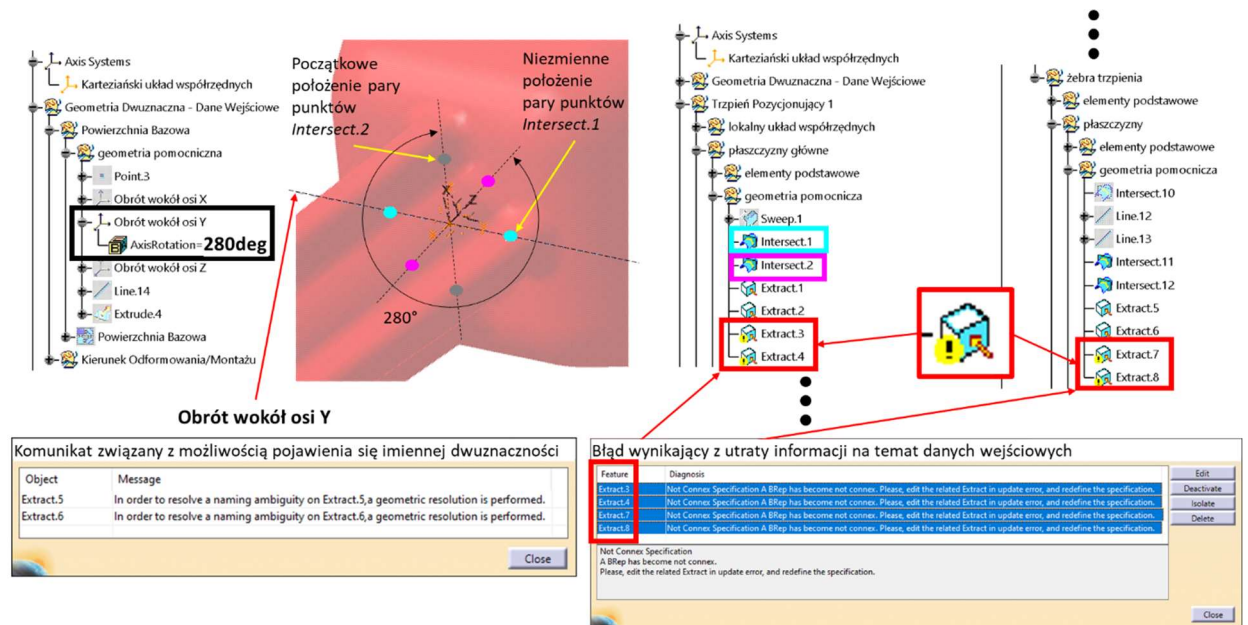
Rys. 118. Wersja I trzpienia pozycjonującego – obrót wokół osi Y o  $160^\circ$  ( $40^\circ+120^\circ$ ) – komunikat związany z możliwością pojawienia się imiennej dwuznaczności i utrata informacji na temat danych wejściowych; czerwony kolor modelu 3D oznacza jego niezaktualizowaną topologię

- W wariantcie drugim nastąpiła prawidłowa interpretacja wyodrębnienia operacji *Intersect.1* i *Intersect.11* i nieprawidłowa ich interpretacja operacji *Intersect.2* i *Intersect.12* w wyniku czego część dalszej struktury modelu 3D została również błędnie zinterpretowana (rys. 119). Oba warianty zakończyły się więc wynikiem negatywnym.



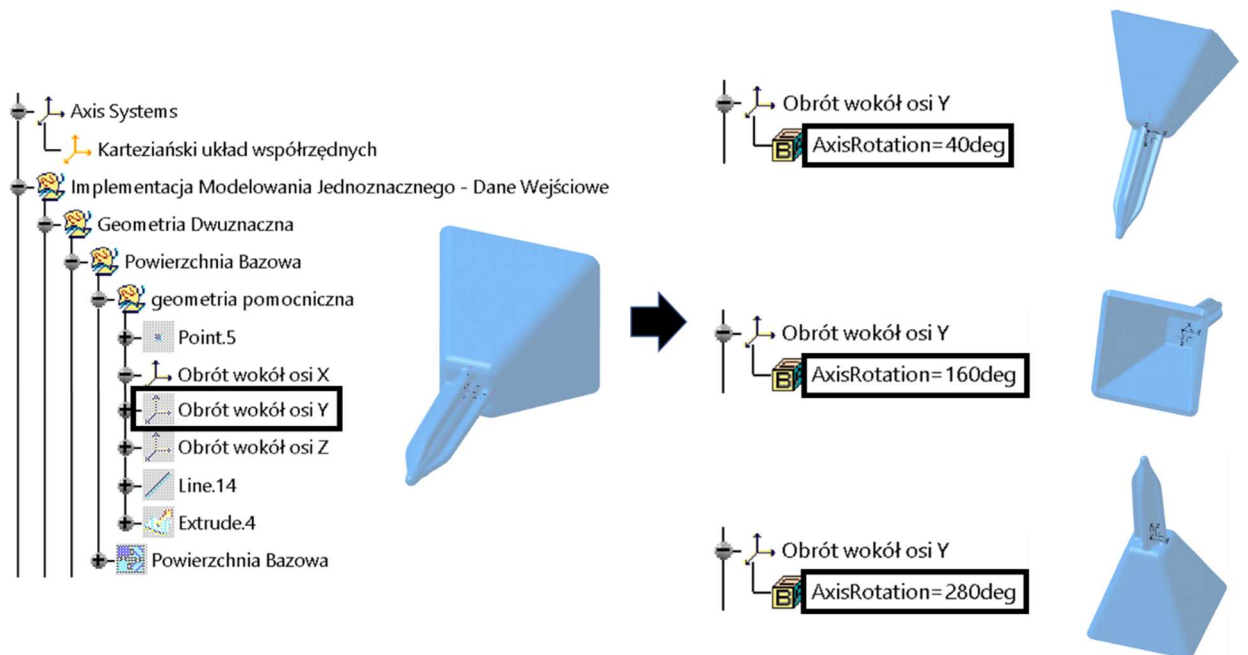
Rys. 119. Wersja I trzpienia pozycjonującego – obrót wokół osi Y o  $160^\circ$  – błędna interpretacja punktów leżących w bliskiej odległości ich odpowiedników w logicznie połączonych parach punktów *Intersect.2* i *Intersect.12* przez system CAD; czerwony kolor modelu 3D oznacza jego niezaktualizowaną topologię

Szosta próba obrotu Wersji I trzpienia o  $280^\circ$  względem osi Y lokalnego układu współrzędnych *Obrót wokół osi Y* również zakończyła się wynikiem negatywnym. Mimo, że system CAD poprawnie zidentyfikował wyodrębnione punkty z operacji *Intersect.1* i *Intersect.11*, to w związku z występującą imienną dwuznacznością utracił informację na temat danych wejściowych dla wyodrębnień z operacji *Intersect.2* i *Intersect.12* (rys. 120).



Rys. 120. Wersja I trzpienia pozycjonującego – obrót wokół osi Y o  $280^\circ$  – komunikat związany z możliwością pojawienia się imiennej dwuznaczności i utrata informacji na temat danych wejściowych; czerwony kolor modelu 3D oznacza jego niezaktualizowaną topologię

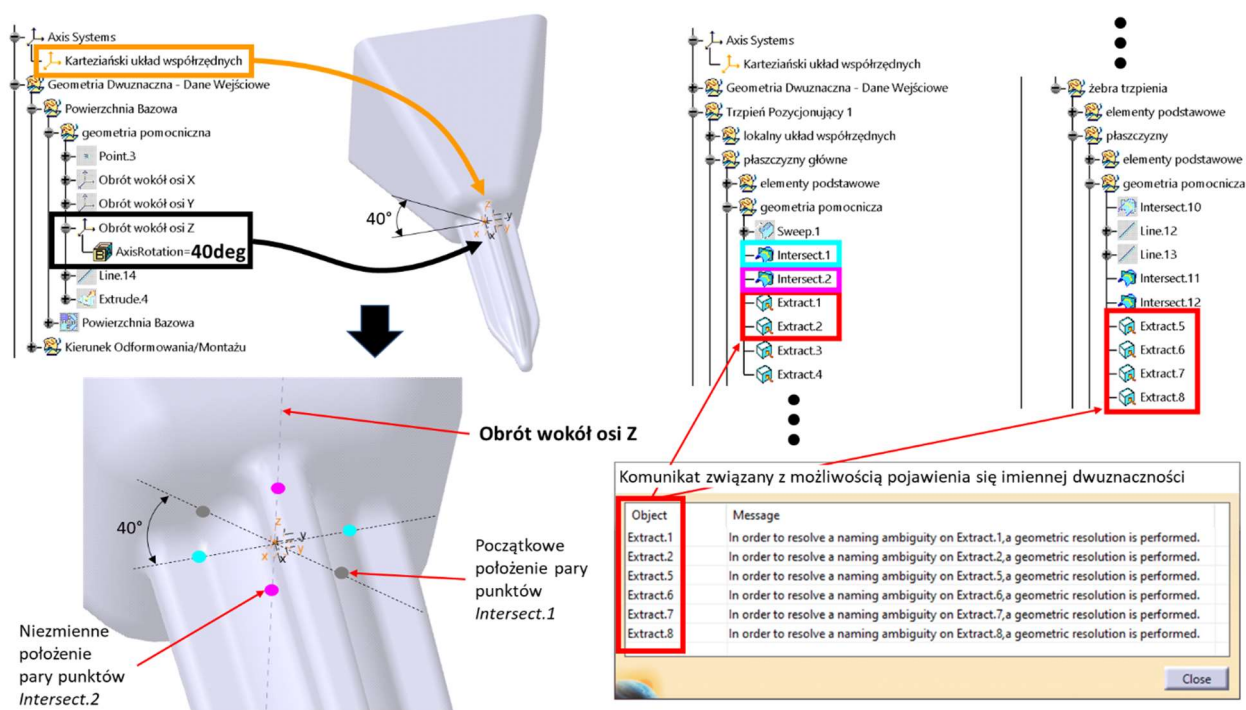
Żaden z opisanych wcześniej błędów ani komunikatów nie wystąpił natomiast podczas prób obrotu Wersji II trzpienia pozycjonującego względem tej samej osi Y (rys. 121). Dzięki zastosowaniu Procedury Neutralności Modelowania Jednoznacznego dla lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* oraz narzędzia programowego *Near/Far* umożliwiającego automatyczny wybór geometrii przez system CAD uzależniony od jej położenia w stosunku do innej geometrii (rys. 109), proces aktualizacji topologii trzpienia po każdej zmianie wartości kątowej jego obrotu nie wymagał od autora ingerencji i przebiegał bezzwłocznie.



Rys. 121. Wersja II trzpienia pozycjonującego – wszystkie próby jego obrotu wokół osi Y zakończone wynikiem pozytywnym

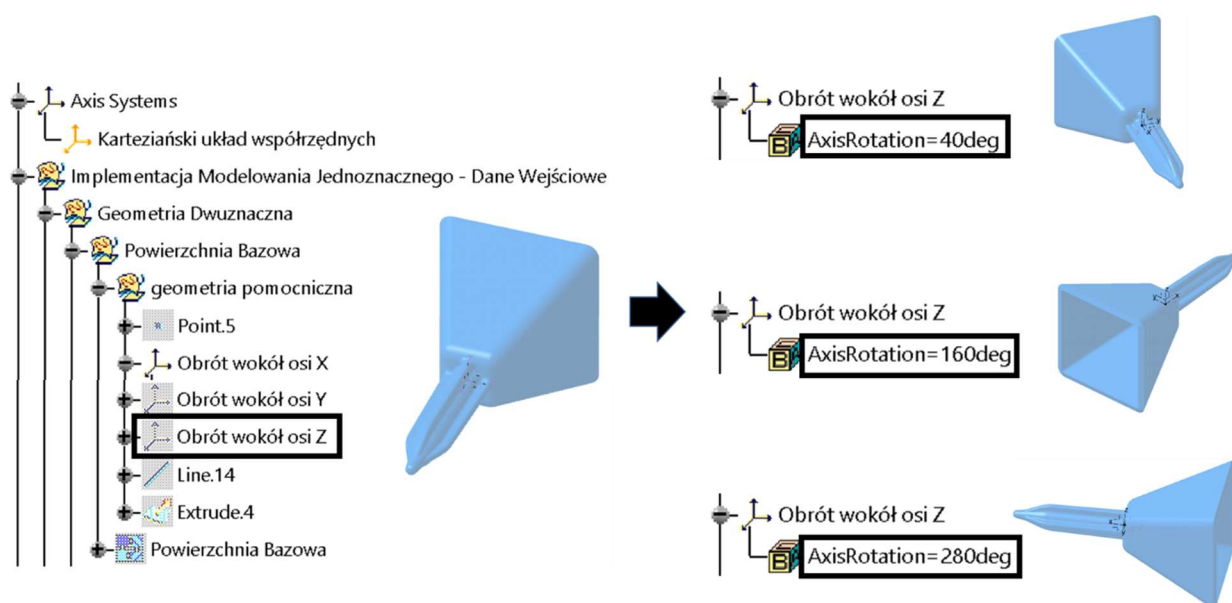
Próba siódma, ósma i dziewiąta obu wersji trzpienia polegające na ich obrocie kolejno o kąt  $40^\circ$ ,  $160^\circ$  i  $280^\circ$  względem osi Z lokalnego układu współrzędnych *Obrót wokół osi Z* przebiegły podobnie jak trzy poprzednie:

- Tylko siódma próba dla Wersji I trzpienia zakończyła się wynikiem pozytywnym, a pozostałe wynikiem negatywnym. Wartą wspomnienia różnicą w tej serii prób był fakt, że ponieważ tym razem osią obrotu była oś Z, to identyfikacja wyodrębnionych punktów z logicznego połączenia *Intersect.2* przez system CAD odbywała się bez wyświetlania dodatkowego komunikatu o jego imiennej dwuznaczności. Działo się tak dlatego, że wyodrębnione punkty logicznego połączenia *Intersect.2* były przecięciami powierzchni cylindrycznej *Sweep.1* i osi Z lokalnego układu współrzędnych, a więc we wszystkich próbach związanych z obrotem trzpienia wokół osi Z nie zmieniały swojego położenia. Zatem system za każdym razem poprawnie interpretował ich nowe, a tak naprawdę te same, położenie w trakcie procesu aktualizacji topologii trzpienia – bez wyświetlania dodatkowego komunikatu o imiennej dwuznaczności (rys. 122).



Rys. 122. Wersja I trzpienia pozycjonującego – obrót wokół osi Z o  $40^\circ$  – komunikat związany z możliwością pojawienia się imiennej dwuznaczności dla części wyodrębnień z logicznych połączeń par punktów

- Trzy ostatnie próby Wersji II trzpienia ponownie zakończyły się wynikiem pozytywnym, podczas których nie pojawił się żaden z wcześniej opisanych błędów ani komunikatów dla prób obrotu Wersji I trzpienia (rys. 123). Proces aktualizacji topologii trzpienia po każdej zmianie wartości kątowej jego obrotu nie wymagał od autora ingerencji i przebiegał bezzwłocznie.

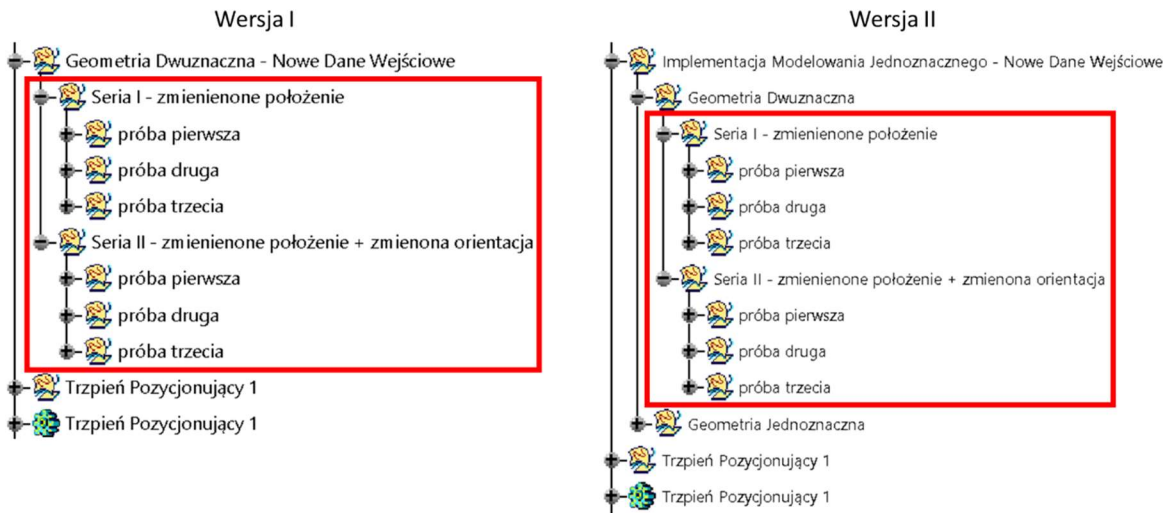


Rys. 123. Wersja II trzpienia pozycjonującego – wszystkie próby jego obrotu wokół osi Z zakończone wynikiem pozytywnym

**Transformacja 3:** Podmiana danych wejściowych modelu 3D (wyniki badań – patrz: Rozdz. 5, Tabela 7 i Tabela 8).

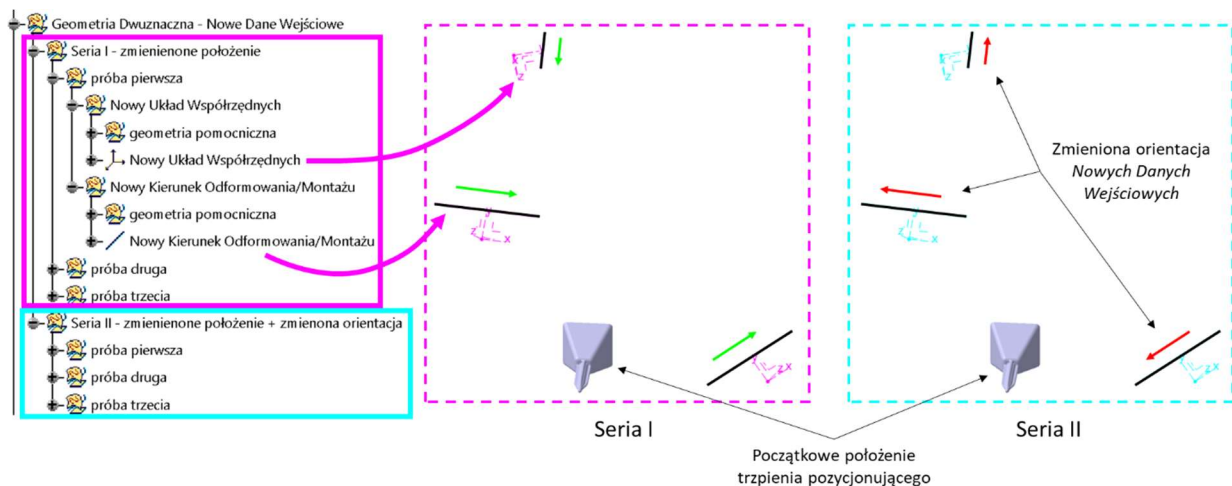
W Transformacji 1 i w Transformacji 2 zmiana położenia trzpienia pozycjonującego odbywała się poprzez modyfikację geometrii, na której oparto jego dane wejściowe – *Powierzchnia Bazowa* i *Kierunek Odformowania/Montażu*. Zatem dane te we wszystkich przeprowadzonych próbach „dostosowywały się” do swojej geometrii nadrzędnej, ale się nie zmieniały. Transformacja 3 polegała na faktycznej podmianie danych wejściowych, a zmiana położenia trzpienia pozycjonującego podyktowana była ich zmienionym, w stosunku do początkowych danych, położeniem. Celem tej transformacji, tak jak poprzednich, było ponownie wykazanie różnic w stabilności topologicznej oraz niezmienności geometrycznej modelu 3D z zaimplementowanym i niezaimplementowanym Modelowaniem Jednoznacznym. Autor chciał w ten sposób zasymulować sytuację, w której konstruktor chce powtórnie wykorzystać istniejący podmiot modelu CAD, jednak docelowe dane wejściowe tego podmiotu muszą się zmienić.

Transformacja 3 została podzielona na dwie serie po trzy próby. W trzech próbach Serii I podmieniane dane wejściowe różniły się położeniem, natomiast ich orientacja była taka sama. W trzech próbach Serii II *Nowe Dane Wejściowe* oprócz zmienionego położenia posiadały również zmienioną orientację (rys. 124).

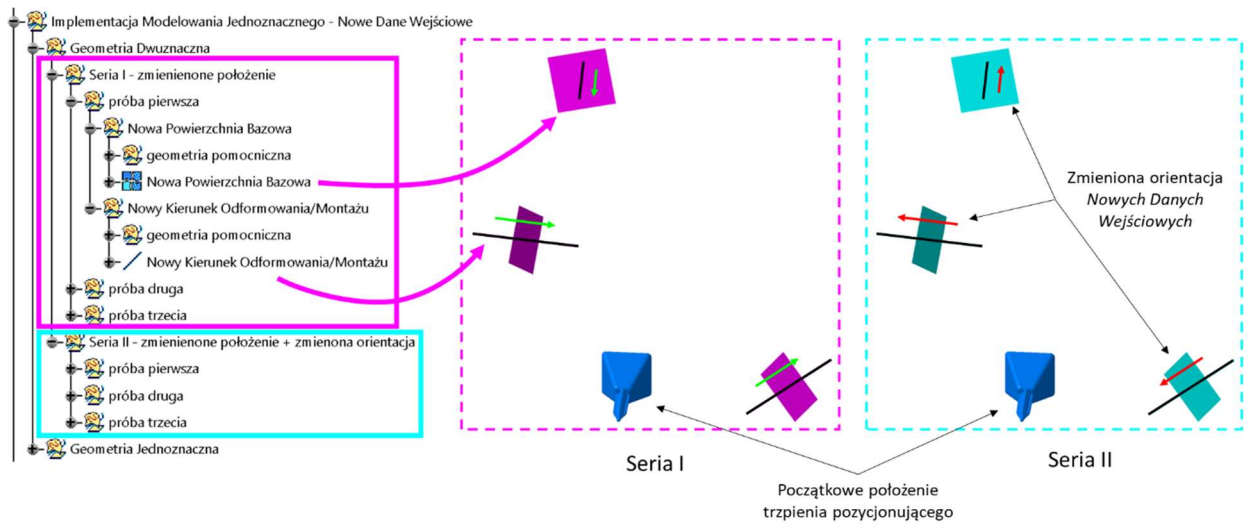


Rys. 124. Drzewo struktury trzpienia pozycjonującego w Wersji I (po lewej) i w Wersji II (po prawej)

W tym miejscu autor chciałby przypomnieć, że dane wejściowe użyte do utworzenia lokalnego układu współrzędnych Wersji I i Wersji II trzpienia, czyli elementu, na podstawie którego zbudowano zarówno ich topologię powierzchniową jak i bryłową, nie były takie same, co wynikało z implementacji Modelowania Jednoznacznego w Wersji II. W Wersji I topologii trzpienia pozycjonującego wykorzystano więc *Kierunek Odformowania/Montażu* oraz *Kartezjański układ współrzędnych* (rys. 98), a w Wersji II wykorzystano geometrycznie dwuznaczną *Powierzchnię Bazową* wraz z *Procedurą Neutralności* (rys. 99). Dodatkowo, Wersję II trzpienia oparto na *Kierunku Odformowania/Montażu* wraz z *Procedurą Jednoznaczności* (rys. 100). W związku z powyższym *Nowe Dane Wejściowe* dla Wersji I trzpienia składały się z *Nowego Kierunku Odformowania/Montażu* i z *Nowego Układu Współrzędnych* pełniącego w tym przypadku rolę lokalnego kartezjański układu współrzędnych (rys. 125), a dla Wersji II trzpienia składały się z *Nowej Powierzchni Bazowej* i z *Nowego Kierunku Odformowania/Montażu* (rys. 126).

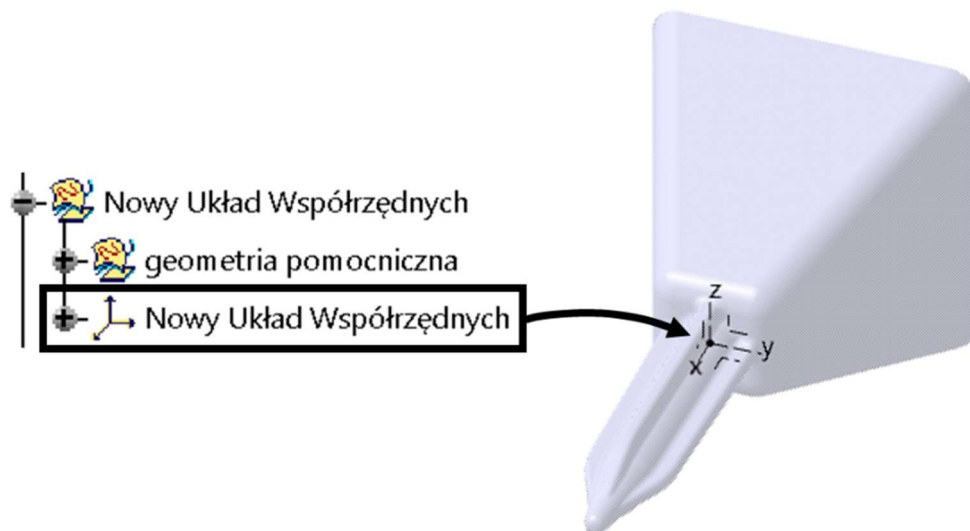


Rys. 125. Wersja I trzpienia pozycjonującego – *Nowe Dane Wejściowe* w postaci *Nowego Kierunku Odformowania/Montażu* i *Nowego Układu Współrzędnych*



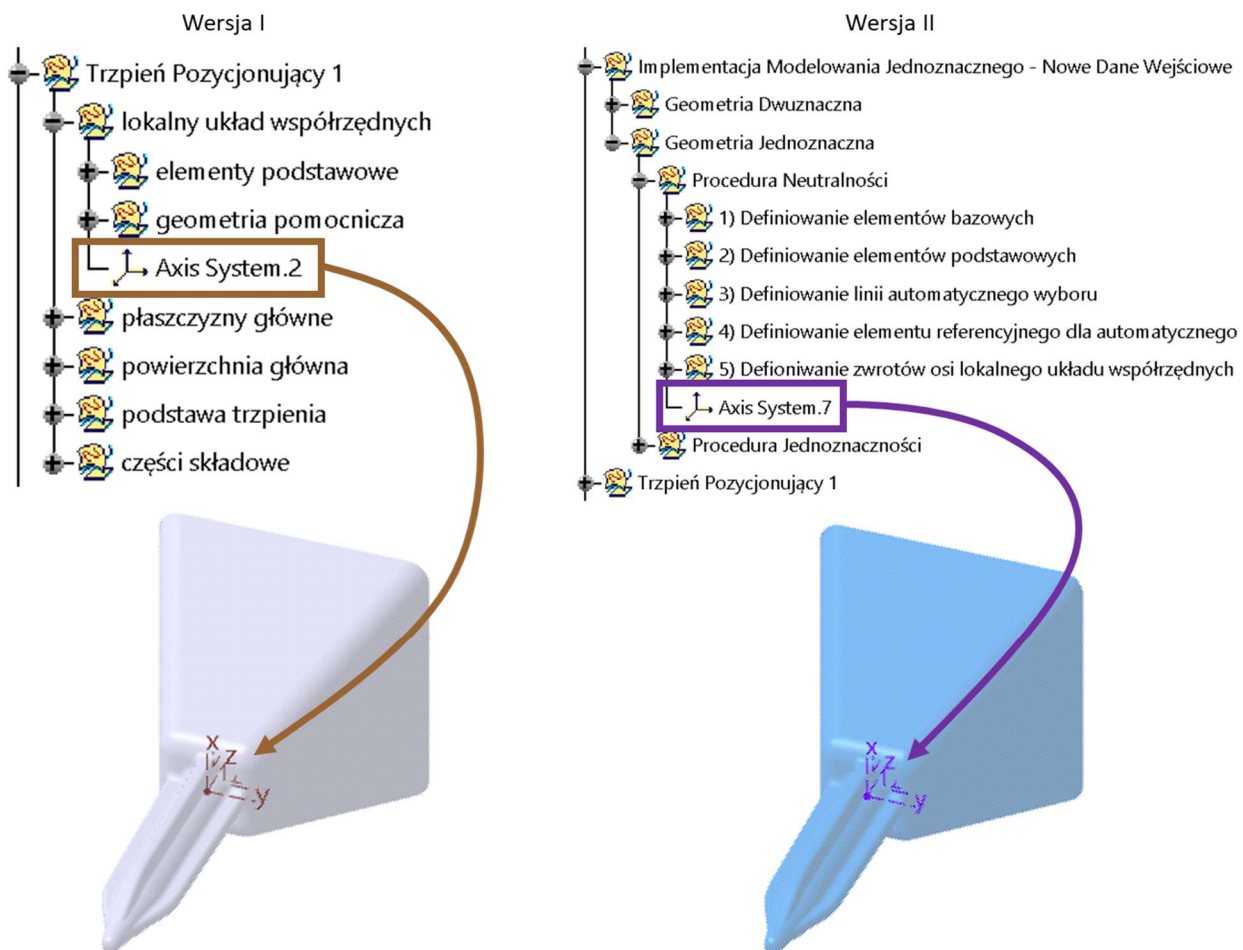
Rys. 126. Wersja II trzpienia pozycjonującego – *Nowe Dane Wejściowe* w postaci *Nowej Powierzchni Bazowej* i *Nowego Kierunku Odformowania/Montażu*

O ile zwrot i kierunek Wersji I trzpienia był określony automatycznie przez odpowiednio zdefiniowany *Nowy Układ Współrzędnych* (rys. 127), o tyle orientację jego Wersji II autor mógł samodzielnie określić w **Kroku 1**) Procedury Neutralności, w którym definiowanie elementów bazowych wpływało na orientację lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7*.



Rys. 127. *Nowy Układ Współrzędnych* służący do określenia zwrotu i kierunku trzpienia pozycjonującego w Wersji I

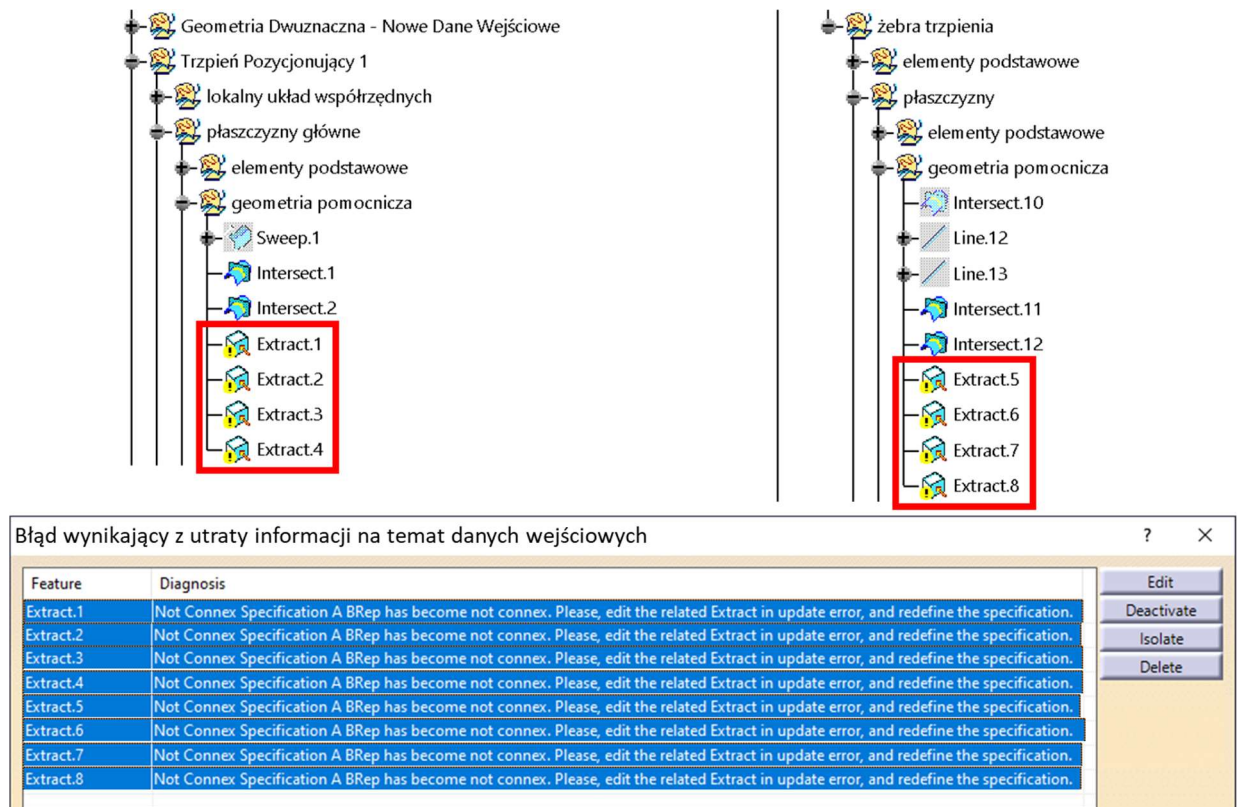
Dla przypomnienia, definiowanie elementów bazowych w Procedurze Neutralności polega na wyodrębnieniu dwóch krzywych z geometrycznie dwuznacznej powierzchni pełniącej rolę danej wejściowej. Krzywe te mają kluczowy wpływ na położenie i orientację pierwszego elementu podstawowego danego modelu 3D lub jego podmiotu – lokalnego układu współrzędnych. Pierwsza krzywa pełni rolę elementu pozycjonującego ten układ, a druga jest elementem referencyjnym dla automatycznego wyboru zwrotu jednej z jego osi (rys. 76). W opisywanym przypadku wyodrębnianie krzywych z *Nowej Powierzchni Bazowej* przeprowadzono w taki sposób, aby lokalny układ współrzędnych *Axis System.7* Wersji II trzpienia pokrywał się z lokalnym układem współrzędnych *Axis System.2* jego Wersji I, tak by ich orientacja mogła się pokrywać (rys. 128).



Rys. 128. Orientacja lokalnego układu współrzędnych *Axis System.2* Wersji I trzpienia pozycjonującego zgodna z orientacją lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* Wersji II trzpienia pozycjonującego

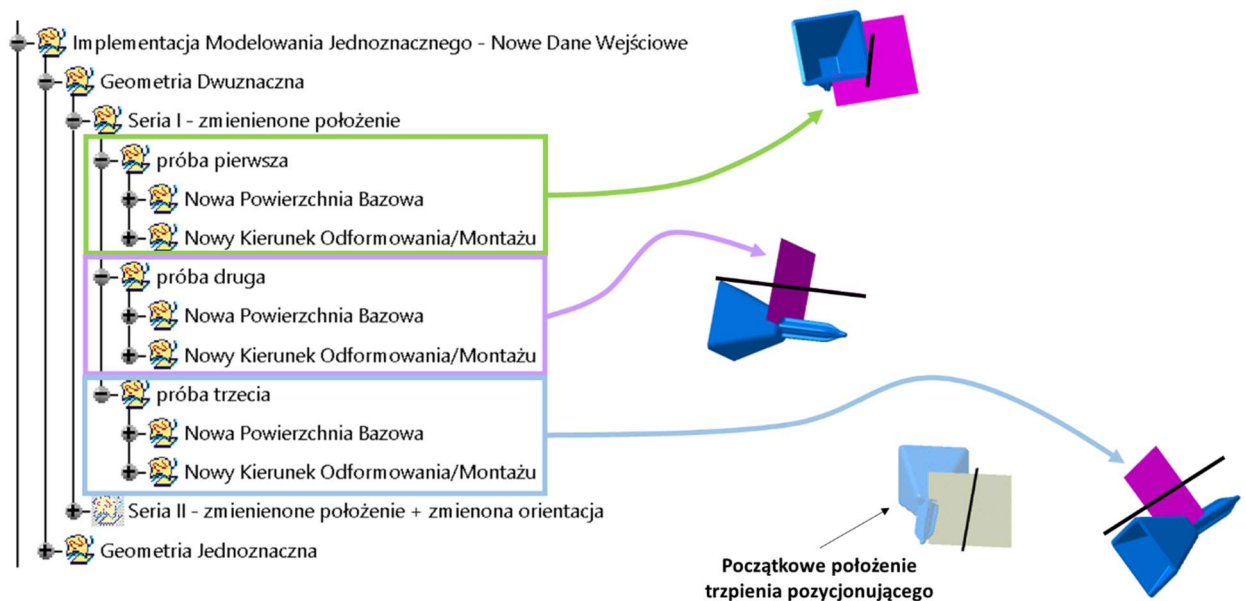
Wszystkie próby Serii I dla Wersji I trzpienia zakończyły się wynikiem negatywnym. Podmiana *Nowego Kierunku Odformowania/Montażu* i *Nowego Układu Współrzędnych* spowodowała utratę informacji na temat danych wejściowych dla wyodrębnień z operacji *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12* przez system CAD (rys. 129).





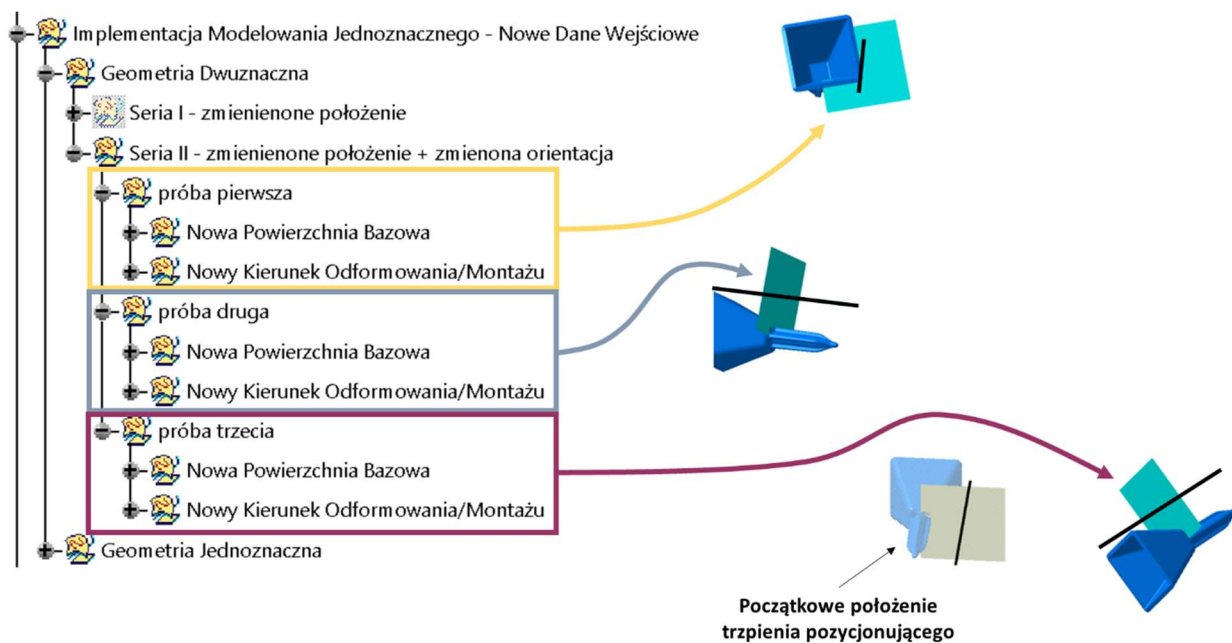
Rys. 129. Wersja I trzpienia pozycjonującego – wszystkie próby Serii I podmiiany jego danych wejściowych zakończone utratą informacji na temat danych wejściowych dla wyodrębnień z operacji *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12* przez system CAD

W Wersji II trzpienia, po prawidłowym zdefiniowaniu elementów bazowych **Kroku 1**) Procedury Neutralności, podmiiana *Nowej Powierzchni Bazowej* i *Nowego Kierunku Odformowania/Montażu* nie wiązała się z niezamierzonymi przez autora konsekwencjami, a system CAD nie wyświetlił żadnych błędów ani dodatkowych komunikatów. Trzpień zachował stabilność topologiczną i geometryczną, a więc wszystkie próby Serii I zakończyły się wynikiem pozytywnym (rys. 130).



Rys. 130. Wersja II trzpienia pozycjonującego – wszystkie próby Serii I podmiiany jego danych wejściowych zakończone wynikiem pozytywnym

Wszystkie próby Serii II dla Wersji I trzpienia zakończyły się wynikiem negatywnym. Dodatkowa zmiana orientacji *Nowego Kierunku Odformowania/Montażu* sprawiła, że zmianie orientacji uległy wszystkie podrzędne mu operacje modelowania. Ich aktualizacja nie była możliwa z powodu ponownej, jak w Serii I, utraty informacji na temat danych wejściowych dla wyodrębnień z operacji *Intersect.1*, *Intersect.2*, *Intersect.11* i *Intersect.12* (rys. 129). Gdyby jednak założyć, że wynikająca z tych wyodrębnień imienna dwuznaczność w rozpatrywanym przykładzie modelu CAD nie występuje, to proces aktualizacji również nie zakończyłby się pomyślnie, bo system CAD wyświetliłby komunikat o wystąpieniu błędu geometrycznego wywołanego przez nieprawidłowo utworzoną geometrię. Seria II prób podmiany danych wejściowych dla Wersji II trzpienia zakończyła się natomiast wynikiem pozytywnym. Dzięki implementacji do jego topologii Procedury Neutralności i Procedury Jednoznaczności Modelowania Jednoznacznego, zmiana orientacji *Nowych Danych Wejściowych* nie miała wpływu na stabilność topologiczną i geometryczną trzpienia, a system CAD nie wyświetlił żadnych błędów ani dodatkowych komunikatów (rys. 131).



Rys. 131. Wersja II trzpienia pozycjonującego – wszystkie próby Serii II podmiany jego danych wejściowych zakończone wynikiem pozytywnym

#### 4.5 Implementacja Modelowania Jednoznacznego do badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD (wyniki badań – patrz: Rozdz. 5, Tabele 9 – 11)

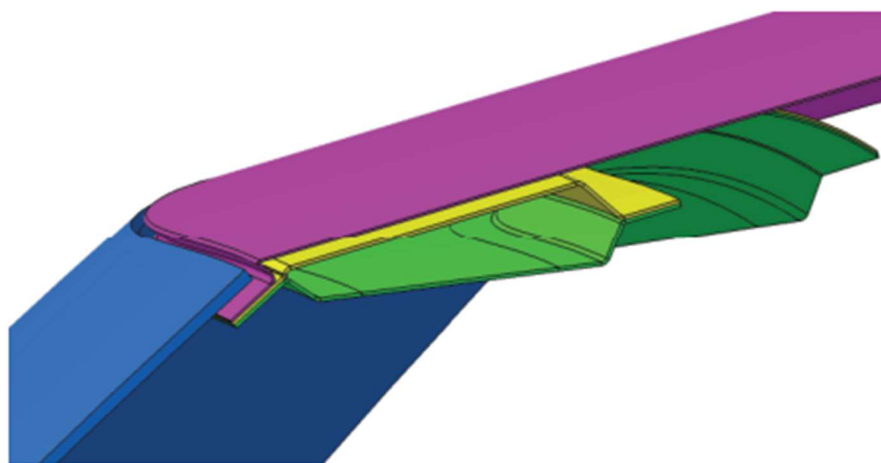
O ile w poprzednim punkcie autor zaprezentował implementację Modelowania Jednoznacznego do topologii modelu CAD, która została utworzona według jego zaleceń, czyli uwzględniając proces jej optymalizacji, o tyle w tym punkcie autor podjął próbę zaprezentowania skuteczności implementacji proponowanej metodologii do topologii modelu wykonanej innymi niż zalecanymi przez autora technikami. Danymi wejściowymi tych badań stały się inne badania przeprowadzone przez Gerharda Tecklenburga, który w swojej pracy doktorskiej *Design of Automotive Body Assemblies with Distributed Tasks under Support of Parametric Associative Design (PAD)* [53] wykazał większą efektywność jednych technik modelowania nad innymi. Głównym celem badań autora, było udowodnienie Tezy 3 i Tezy 4 sformułowanych na początku niniejszej rozprawy, według których:

**Teza 3:** Każda metodyka tworzenia topologii modelu CAD lub jego podmiotu zapewnia jego stabilność geometryczną, jeśli orientacja danych wejściowych tej topologii jest zdefiniowana w sposób jednoznaczny.

**Teza 4:** Rodzaj wybranej metodyki tworzenia topologii modelu CAD lub jego podmiotu ma pomijalny wpływ na czas potrzebny na aktualizację tej topologii, jeśli orientacja danych wejściowych tej topologii jest zdefiniowana w sposób jednoznaczny.

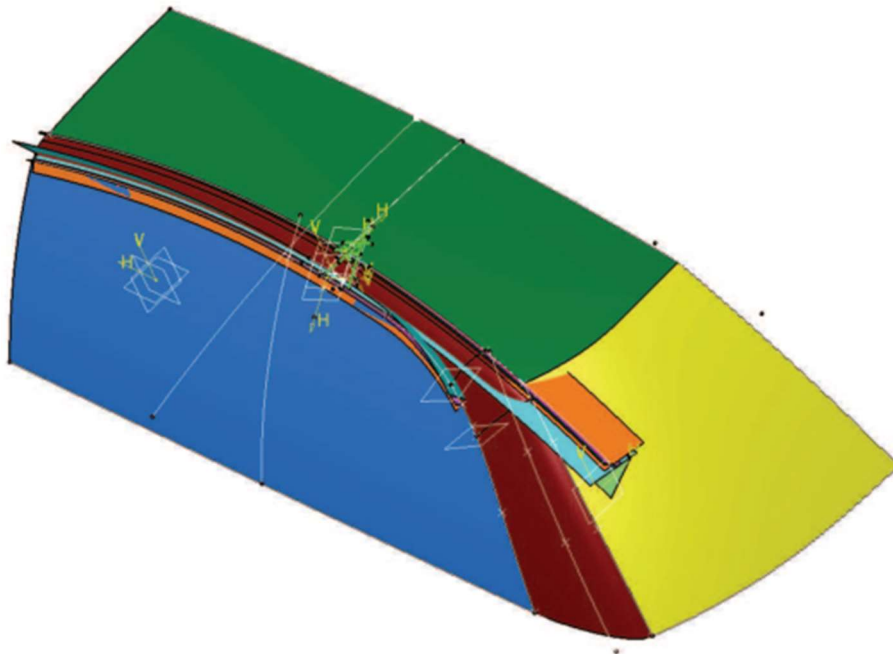
G. Tecklenburg, będący ówczesnym wykładowcą na Uniwersytecie HAW w Hamburgu, a dziś będący jego profesorem, miał okazję współpracować z największymi niemieckimi koncernami motoryzacyjnymi nad technikami tworzenia modeli CAD pojedynczych komponentów i ich złożeń. Zaproponował on metodykę polegającą na podziale konstruowanej karoserii samochodowej na strefy, a nie jak do tej pory – na poszczególne komponenty. Konstruktorzy byli więc odpowiedzialni za przydzielone im strefy danej karoserii, a podstawą ich tworzenia stały się parametryczne i asocjatywne profile, co oznaczało, że były budowane w oparciu o technikę projektowania PAD (ang. *Parametric Associative Design*). Profile te w formie przekrojów generowane były w dwuwymiarowym środowisku Szkicownika lub bezpośrednio w trójwymiarowym środowisku przestrzeni roboczej danego systemu CAD. Utworzone w ten sposób przekroje stały się podstawowymi danymi projektowo-konstrukcyjnymi w koncepcyjnej fazie projektowania karoserii samochodowych takich firm jak Volkswagen czy BMW, a w późniejszym czasie również pozostałych przedstawicieli branży motoryzacyjnej. Jednak zanim do tego doszło G. Tecklenburg wraz ze swoimi studentami i w ścisłej współpracy z samochodowymi biurami projektowymi wykonał szereg badań mających na celu wybór optymalnej, biorąc pod uwagę przyjęte kryteria wyboru, techniki tworzenia tych przekrojów. Zawarte w jego pracy badania polegały na:

- 1) utworzeniu przekroju dla trzech różnych stref karoserii samochodowej w sześciu wersjach, za każdym razem wykorzystując do jego budowy procedurę konstrukcyjną opartą o inną Zasadę:
  - dla *Tyłnego Rejonu Dachy* (rys. 132),

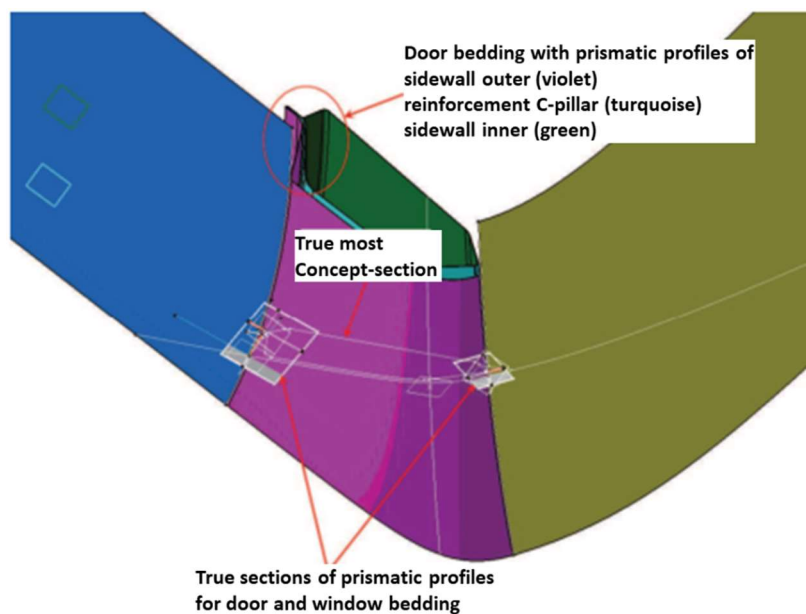


Rys. 132. Przedmiot badań G. Tecklenburga – *Tyłny Rejon Dachy* [53]

- dla *Bocznego Rejonu Dachy* (rys. 133),



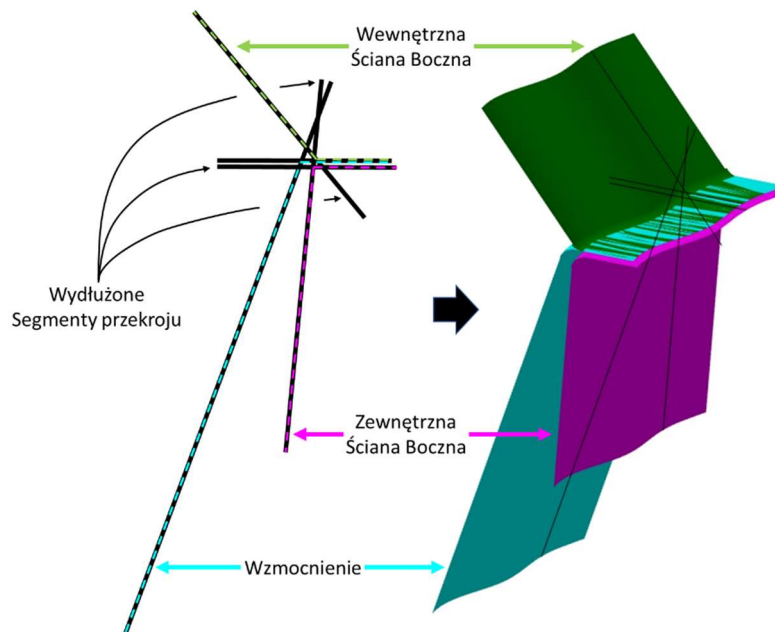
Rys. 133. Przedmiot badań G. Tecklenburga – *Boczny Rejon Dachy* [53]  
- dla *Tylnego Słupka C* (rys. 134).



Rys. 134. Przedmiot badań G. Tecklenburga – *Tylny Słupek C* [53]

- 2) wygenerowaniu powierzchni komponentów tworzących daną strefę karoserii samochodowej na podstawie profili wchodzących w skład danego przekroju wzdłuż wybranej *Powierzchni Bazowej*,
- 3) przeprowadzeniu kilku transformacji geometrycznych na utworzonych przekrojach, a co za tym idzie, na wygenerowanych powierzchniach.

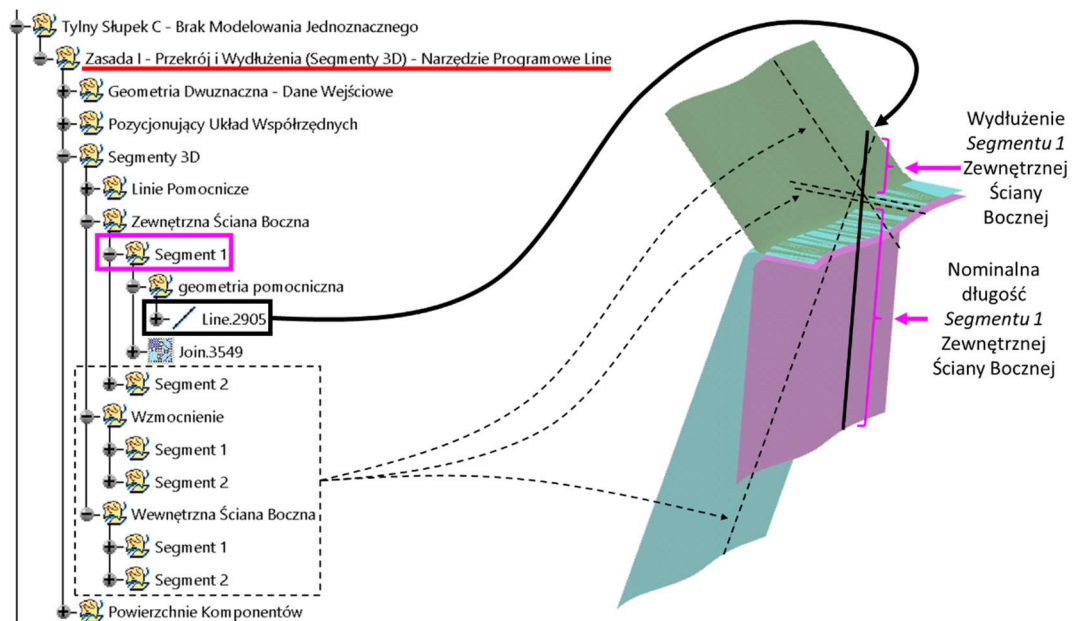
W skład badanych przekrojów wchodziły trzy profile komponentów tworzących daną strefę karoserii samochodowej: profil *Zewnętrznej Ściany Bocznej*, profil *Wzmocnienia*, profil *Wewnętrznej Ściany Bocznej* i reprezentowane były przez wydłużone i przecinające się segmenty. Wydłużenia każdego segmentu miały zapewniać ich przecinanie w taki sposób, aby utworzone na ich bazie powierzchnie mogły zostać przycięte i zaokrąglone (rys. 135).



Rys. 135. Trzy profile komponentów danej strefy karoserii samochodowej: profil *Zewnętrznej Ściany Bocznej*, profil *Wzmocnienia*, profil *Wewnętrznej Ściany Bocznej*, reprezentowane przez wydłużone i przecinające się segmenty oraz przez przycięte i zaokrąglone na ich podstawie powierzchnie

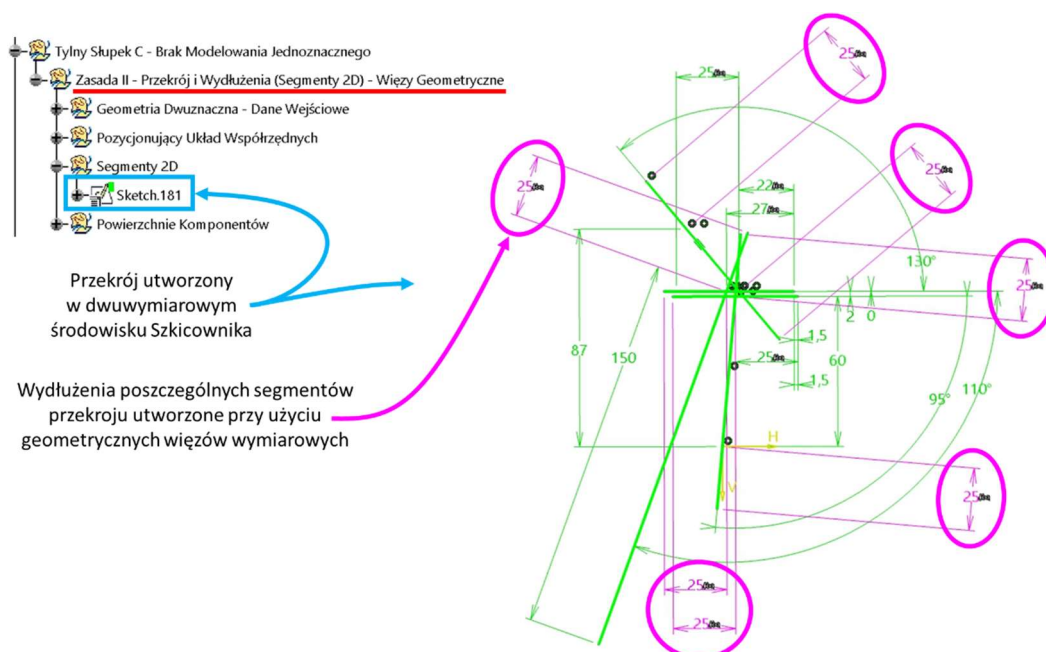
W każdej procedurze konstrukcyjnej owe wydłużenia realizowane były poprzez zastosowanie innej Zasady, która stanowiła jednocześnie jedną z podstaw topologicznych tej procedury dla danego przekroju:

**Zasada I – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 3D) – Narzędzie Programowe Line:** Przekrój jak i jego wydłużenia zostały utworzone bezpośrednio w trójwymiarowym środowisku przestrzeni roboczej danego systemu CAD w taki sposób, że nominalna długość każdego segmentu tworzącego dany profil komponentu i wydłużenie tego segmentu zostały zdefiniowane w jednej operacji – przy użyciu jednego narzędzia programowego (*Line*) (rys. 136).



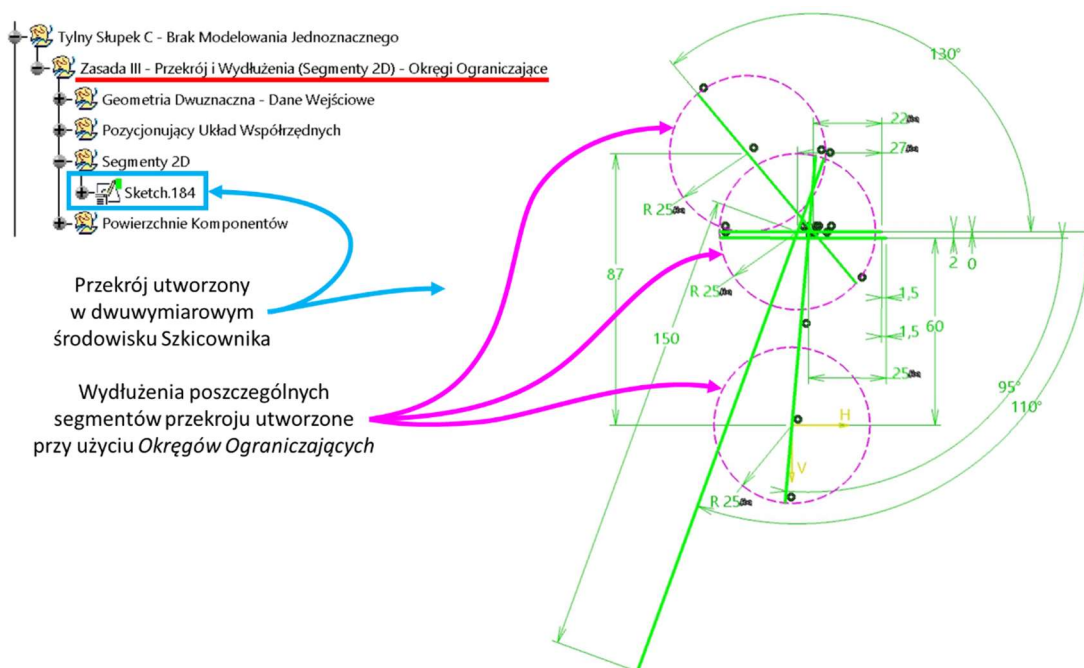
Rys. 136. Procedura konstrukcyjna G. Tecklenburga oparta o *Zasadę I – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 3D) – Narzędzie Programowe Line*

**Zasada II – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 2D) – Więzy Geometryczne:** Przekrój został utworzony w dwuwymiarowym środowisku Szkicownika. Jego wydłużenia zostały zdefiniowane również w tym środowisku poprzez implementację odpowiednich więzów geometrycznych (rys. 137).



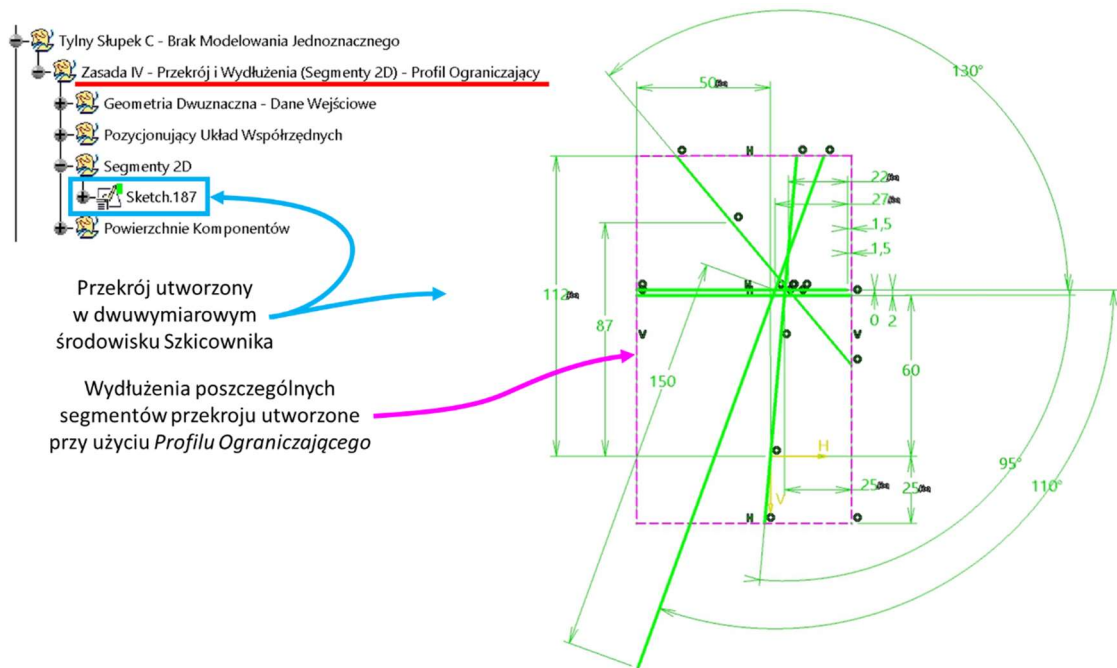
Rys. 137. Procedura konstrukcyjna G. Tecklenburga oparta o *Zasadę II – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 2D) – Więzy Geometryczne* – na podstawie [53]

**Zasada III – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 2D) – Okręgi Ograniczające:** Przekrój został utworzony w dwuwymiarowym środowisku Szkicownika. Jego wydłużenia zostały zdefiniowane również w tym środowisku poprzez utworzenie dodatkowych okręgów ograniczających (rys. 138).



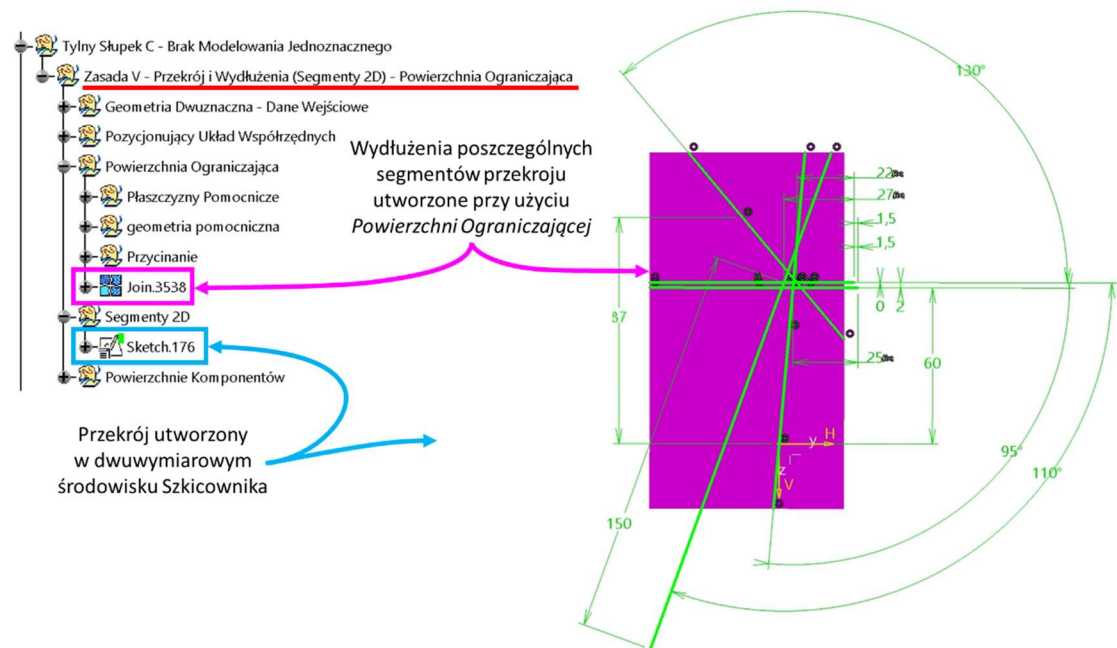
Rys. 138. Procedura konstrukcyjna G. Tecklenburga oparta o *Zasadę III – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 2D) – Okręgi Ograniczające* – na podstawie [53]

**Zasada IV – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 2D) – Profil Ograniczający:** Przekrój został utworzony w dwuwymiarowym środowisku Szkicownika. Jego wydłużenia zostały zdefiniowane również w tym środowisku poprzez utworzenie dodatkowego profilu ograniczającego (rys. 139).



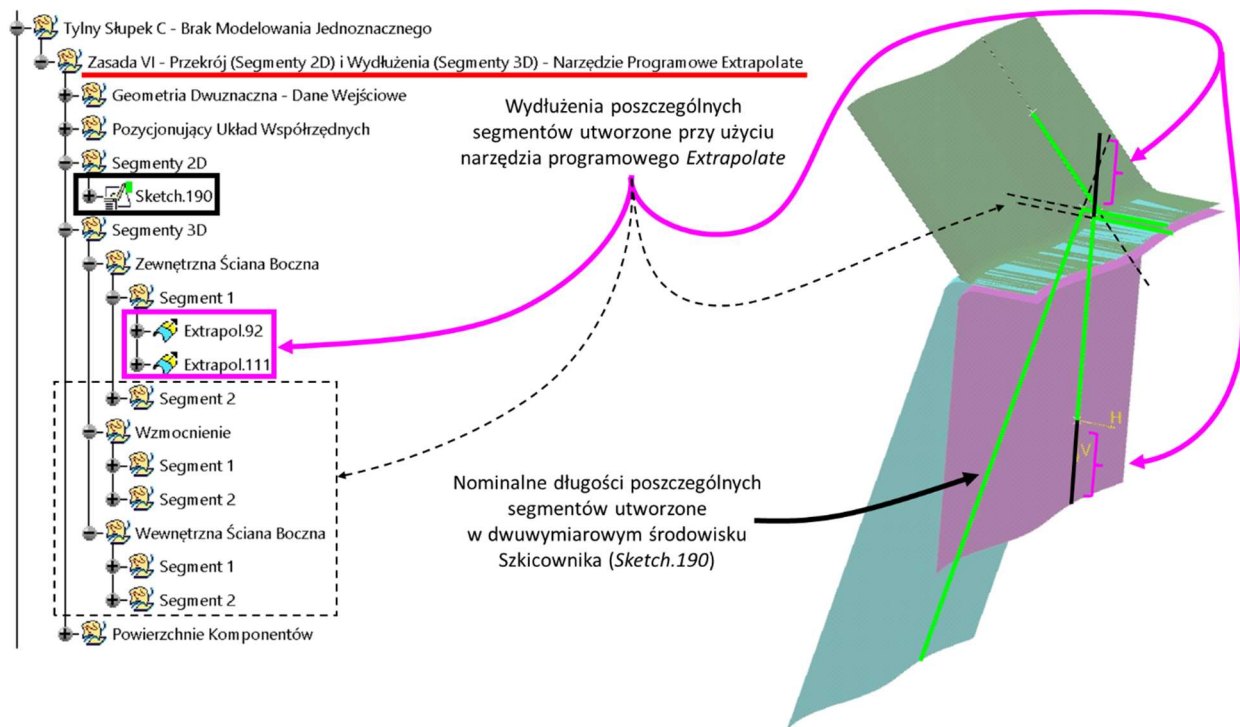
Rys. 139. Procedura konstrukcyjna G. Tecklenburga oparta o *Zasadę IV – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 2D) – Profil Ograniczający* – na podstawie [53]

**Zasada V – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 2D) – Powierzchnia Ograniczająca:** Przekrój został utworzony w dwuwymiarowym środowisku Szkicownika. Jego wydłużenia zostały zdefiniowane również w tym środowisku przy użyciu dodatkowej powierzchni ograniczającej utworzonej bezpośrednio w trójwymiarowym środowisku przestrzeni roboczej danego systemu CAD (rys. 140).



Rys. 140. Procedura konstrukcyjna G. Tecklenburga oparta o *Zasadę V – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 2D) – Powierzchnia Ograniczająca* – na podstawie [53]

**Zasada VI – Przekrój (Segmenty 2D) i Wydłużenia (Segmenty 3D) – Narzędzie Programowe Extrapolate:** Nominalne długości poszczególnych segmentów przekroju zostały utworzone w dwuwymiarowym środowisku Szkicownika. Wydłużenia tych segmentów zostały zdefiniowane bezpośrednio w trójwymiarowym środowisku przestrzeni roboczej danego systemu CAD przy użyciu punktów początkowych i końcowych tych segmentów oraz narzędzia programowego służącego do wydłużania geometrii (*Extrapolate*, rys. 141).

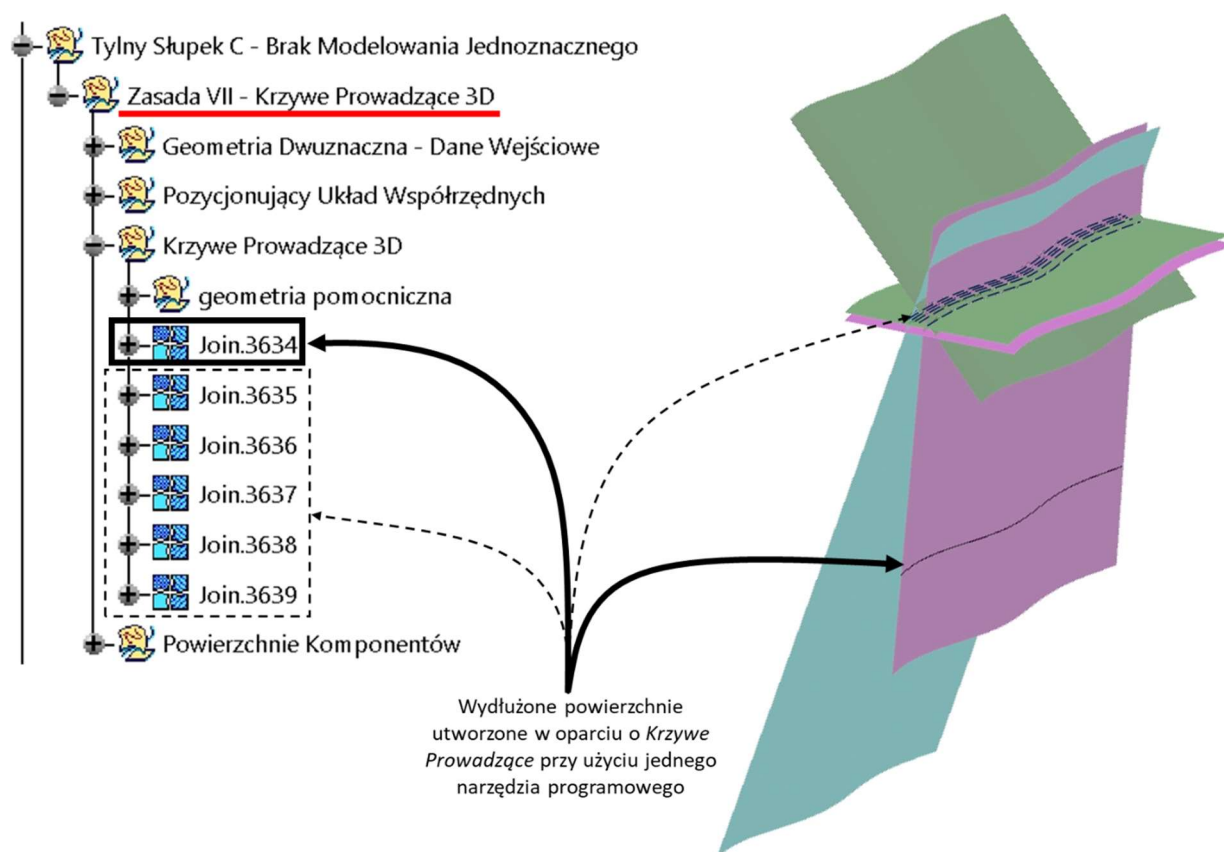


Rys. 141. Procedura konstrukcyjna G. Tecklenburga oparta o *Zasadę VI – Przekrój (Segmenty 2D) i Wydłużenia (Segmenty 3D) – Narzędzie Programowe Extrapolate*

Przedmiotem badań była również dodatkowa procedura konstrukcyjna oparta nie na przekroju, lecz na krzywych prowadzących służących do definiowania powierzchni poszczególnych komponentów tych samych stref karoserii samochodowej. Zatem w ostatniej procedurze konstrukcyjnej wykorzystano *Zasadę VII*:

**Zasada VII – Krzywe Prowadzące 3D:** Powierzchnie komponentów tworzących daną strefę karoserii samochodowej zostały utworzone w oparciu o krzywe prowadzące bezpośrednio w trójwymiarowym środowisku przestrzeni roboczej danego systemu CAD. Podobnie jak w przypadku *Zasady I*, nominalna długość każdej powierzchni wchodzącej w skład danego komponentu i wydłużenie tej powierzchni zostały zdefiniowane w jednej operacji – przy użyciu jednego narzędzia programowego (rys. 142).





Rys. 142. Procedura konstrukcyjna G. Tecklenburga oparta o *Zasadę VII – Krzywe Prowadzące 3D*

Wyniki badań G. Tecklenburga zostały przygotowane w oparciu o średnią ważoną dla czterech głównych kategorii:

- 1) łatwość użycia danej procedury konstrukcyjnej do tworzenia określonej geometrii (*Ease of use*),
- 2) czytelność topologiczna danej procedury konstrukcyjnej (*Traceability*),
- 3) stabilność strukturalna podczas aktualizacji danej procedury konstrukcyjnej (*Update stability*),
- 4) redukcja nakładów pracy poprzez powielanie danej procedury konstrukcyjnej (*Effort reduction by replication*).

Tabela wyników (Tabela 1) została natomiast utworzona w oparciu o założenia zawarte w książce Ch. Kepner'a i B. Tregoe'a: *The Rational Manager: A Systematic Approach to Problem Solving and Decision Making* [20]. Zatem dla poszczególnych Kryteriów powyższych kategorii badane procedury były oceniane w skali 1 – 6, gdzie 1 oznaczało najwyższą ocenę, a 6 najgorszą ocenę.

Tabela 1. Tabela wyników badań G. Tecklenburga – na podstawie [53]

	PRINCIPLE		I True section method - 3D only	II True section method - geometrical constraints	III True section method - boundary circle	IV True section method - boundary box	V True section method - boundary box (surface)	VI True section method - extrapolation 3D	VII Surface band method
No.	Evaluation criteria	Weighting	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating
	<b>Ease of use</b>								
1	Ease of use for simply profiles	1,82%	1	2	2	2	2	1	1
2	Ease of use for complex profiles	3,64%	4	3	5	2	1	2	4
3	Ease of use for segment extension	10,91%	4	5	5	3	2	3	3
4	Ease of use - number of design steps	9,09%	3	2	1	1	2	2	5
	<b>Traceability</b>								
5	Traceability for third parties	12,73%	1	2	5	1	1	1	2
6	Traceability - clear arrangement structural tree	7,27%	3	1	2	1	3	2	4
	<b>Update stability</b>								
7	Update stability - Geometrical constraints	14,55%	1	4	5	4	1	2	1
8	Update stability - Effort to edit tree or features	18,18%	4	2	2	1	1	3	5
9	Update stability when references are altered	16,36%	1	4	5	3	1	2	1
10	<b>Effort reduction by replication</b>	5,45%	5	1	5	2	1	5	5
	<b>Final score</b>	<b>100,00%</b>	<b>2,53</b>	<b>2,85</b>	<b>3,82</b>	<b>2,09</b>	<b>1,36</b>	<b>2,31</b>	<b>2,98</b>

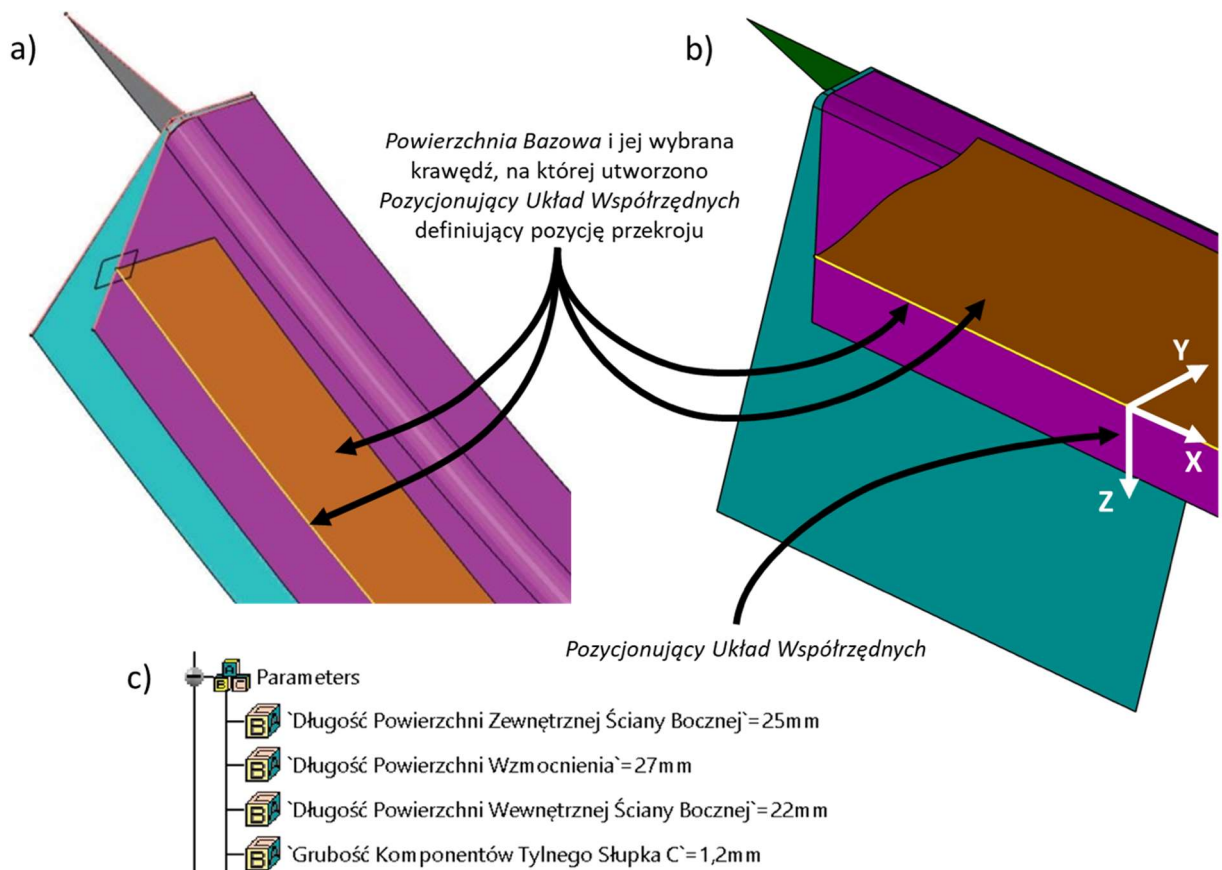
Średnia ważona dla Kryterium  
7, 8, 9 równa **3,89**

Średnia ważona dla  
Kryterium 7, 8, 9 równa **1**

W związku z wysuniętą Tezą 3 i Tezą 4 niniejszej pracy autor skoncentrował się na optymalizacji wyników przedstawionych w Tabeli 1 dotyczących Stabilności Aktualizacji (*Update stability*) danych procedur konstrukcyjnych (Kryterium 7, 8, 9). Była to jednocześnie kategoria o najwyższej wadze dla przeprowadzonych badań (Kryterium 7: **14,55%**, Kryterium 8: **18,18%**, Kryterium 9: **16,36%**), gdyż G. Tecklenburg słusznie zauważył, że stabilność strukturalna modelu 3D w największym stopniu wpływała na tworzenie i późniejsze modyfikowanie tego modelu. Z tabeli wynikało, że najwyższą stabilność strukturalną można było uzyskać stosując Zasadę V (średnia ważona dla Kryterium 7, 8, 9 równa **1**), a najniższą – stosując Zasadę III (średnia ważona dla Kryterium 7, 8, 9 równa **3,89**). Aby zweryfikować te wyniki autor przygotował siedem procedur konstrukcyjnych w oparciu o powyższe Zasady uwzględniając implementację do nich Modelowania Jednoznacznego. Ponieważ dwie z trzech badanych stref karoserii samochodowej nie zostały detalicznie opisane w tekstowej formie pracy G. Tecklenburga (*Tylny Rejonu Dachy* i *Boczny Rejonu Dachy*), autor do poniższej weryfikacji wykorzystał trzecią badaną strefę – *Tylnego Słupka C*.

Autor w każdej odtworzonej procedurze konstrukcyjnej uwzględnił pierwotne założenia, tak by jak najwierniej odwzorować ich topologie. Zatem poszczególne przekroje, powierzchnie komponentów, jak i przestrzenne krzywe prowadzące powstałe w wyniku zastosowania Zasady VII, zostały przygotowane w oparciu o daną wejściową w postaci *Powierzchni Bazowej*, której jedna z krawędzi, dalej nazwana *Krzywą Bazową*, posłużyła do zdefiniowania ich pozycji poprzez utworzony na niej *Pozycjonujący Układ Współrzędnych* oraz w oparciu o kilka głównych *Parametrów Zewnętrznych* ważnych z punktu dalszych transformacji geometrycznych badanych procedur. Utworzona w ten sposób geometria reprezentowała tylko niewielkie fragmenty karoserii

samochodowej, jednak mimo to na jej podstawie możliwe było przeprowadzenie poniższej weryfikacji (rys. 143).

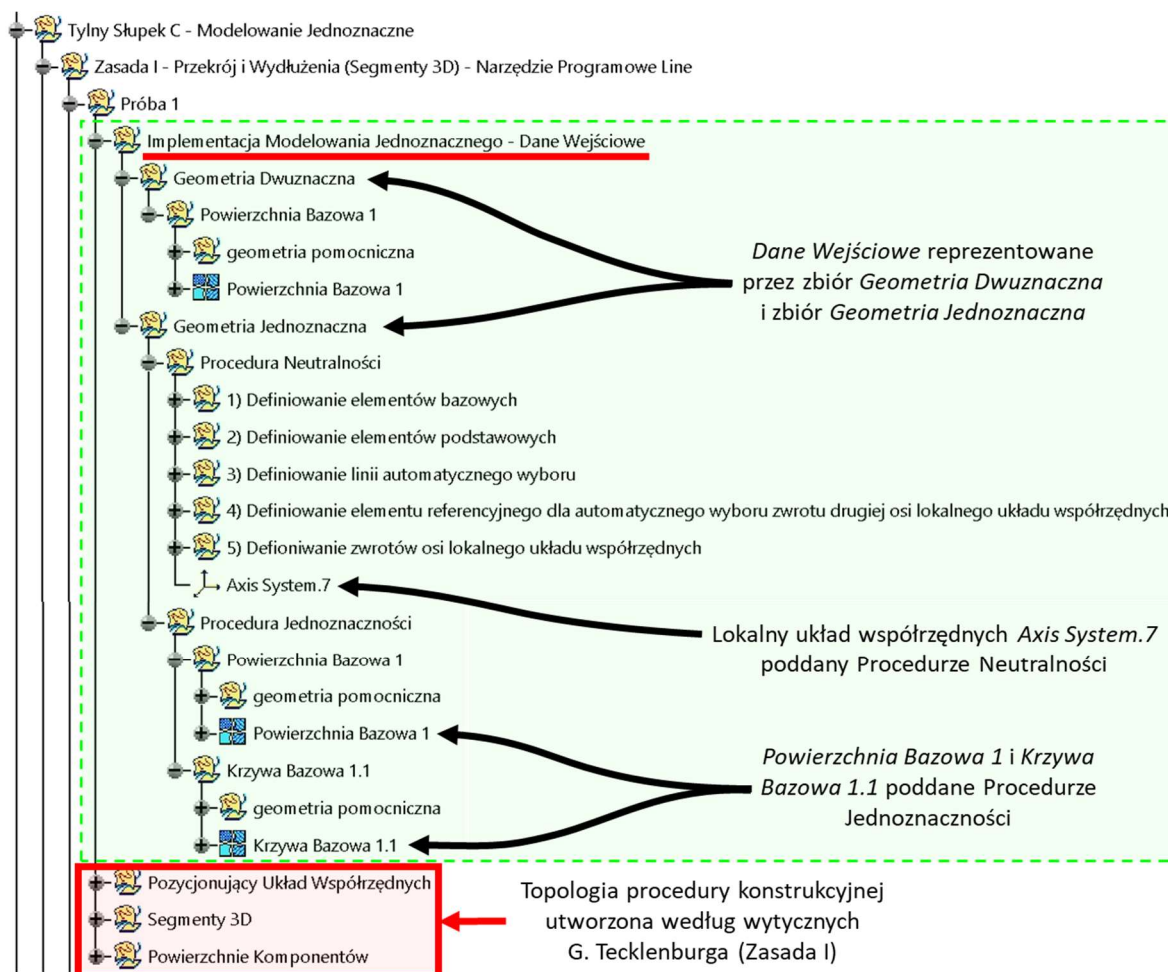


Rys. 143. Fragmenty powierzchni komponentów tworzących daną strefę karoserii samochodowej: a) oryginalny rysunek (obrócony o 180°) z pracy G. Tecklenburga [53], b) odtworzona przez autora geometria na podstawie pracy G. Tecklenburga [53], c) *Parametry Zewnętrzne* wykorzystane do transformacji geometrycznych badanych procedur [53]

Tak jak w przypadku Wersji II trzpienia pozycjonującego opisanego w punkcie 4.5 Rozdziału 4, dane wejściowe w drzewie struktury modelu 3D reprezentowane były przez dwa zbiory: zbiór *Geometria Dwuznaczna*, zawierający *Powierzchnię Bazową 1* i zbiór *Geometria Jednoznaczna*, w którym autor zawarł opisaną w punktach 4.2 i 4.3 Rozdziału 4 *Procedurę Neutralności* i *Procedurę Jednoznaczności*. Natomiast oba zbiory zostały dodatkowo skategoryzowane w ogólnym zestawie geometrycznym *Implementacja Modelowania Jednoznacznego – Dane Wejściowe*. W tym miejscu autor chciałby zwrócić uwagę, że topologia zastosowanych *Procedur Modelowania Jednoznacznego* niczym nie różniła się od wcześniej opisywanych przykładów. Wprawdzie zamiast *Kierunku Odformowania/Montażu* tym razem *Procedurze Jednoznaczności* poddano *Powierzchnię Bazową 1* i jedną z jej krawędzi pod postacią *Krzywej Bazowej 1.1*, lecz nie zmienia to faktu, że zostały one zbudowane w oparciu o uniwersalne wytyczne zdefiniowane i przedstawione na rysunkach 67 i 69 dla tej *Procedury*. Natomiast geometrią neutralną, tak jak w przypadku trzpienia pozycjonującego, był ponownie lokalny układ współrzędnych (*Axis System.7*, rys. 144). Oznacza to, że konstruktor nie musi za każdym razem „manualnie” tworzyć *Procedur Modelowania Jednoznacznego* dla nowego modelu 3D, bo wystarczy, że skopiuje je z wcześniej zrealizowanego projektu. Zorientowany w poruszanej tematyce czytelnik zauważy też zapewne możliwość wykorzystania dodatkowej funkcjonalności systemów CAD polegającej na tworzeniu tak zwanych szablonów konstrukcyjnych (w systemie CATIA V5 narzędzie

programowe *PowerCopy*), aby zautomatyzować proces implementacji Modelowania Jednoznacznego do modeli CAD. Co więcej, taki szablon konstrukcyjny może być utworzony w formie tak zwanej cechy użytkownika (w systemie CATIA V5 narzędzie programowe *UserFeature*), dzięki której Procedury Modelowania Jednoznacznego mogą przybrać formę narzędzi programowych z udostępnionymi dla użytkownika tylko określonymi ich atrybutami. Po zastosowaniu szablonu typu *UserFeature* system CAD ukrywa „zbędne” elementy konstrukcyjne w taki sposób, że:

- użytkownik nie wie, jak zaprojektowane zostały szczegóły konstrukcyjne – jest to więc doskonała metoda ochrony kapitału intelektualnego firmy, jakim w tym przypadku może być implementacja Modelowania Jednoznacznego,
- użytkownik ma ograniczone definicją szablonu możliwości modyfikacji – zapewnione jest przestrzeganie norm zakładowych czy branżowych [59].



Rys. 144. Implementacja Modelowania Jednoznacznego do techniki modelowania zaproponowanej przez G. Tecklenburga

Zatem tak jak w przypadku implementacji Modelowania Jednoznacznego do drzewa struktury modelu CAD opisanej w punkcie 4.4 Rozdziału 4, autor „włączył” do weryfikowanych topologii Procedury, które pozwoliły wyeliminować z nich dwuznaczność geometryczną nie zmieniając przy tym pierwotnych technik tworzenia tych topologii. Natomiast sama weryfikacja polegała na:

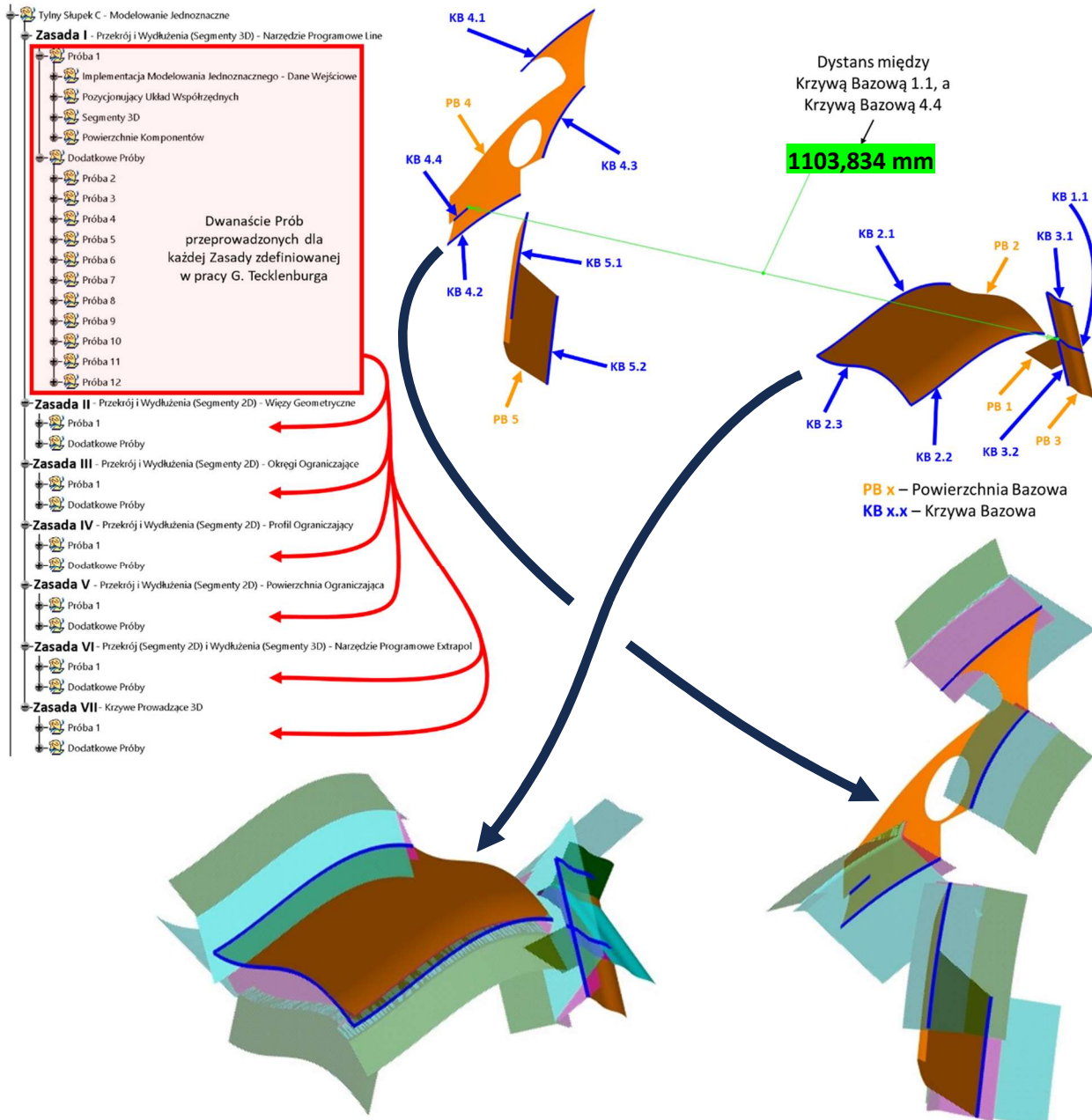
- zmianie orientacji danej wejściowej w postaci *Powierzchni Bazowej* we wszystkich topologiach procedur konstrukcyjnych przygotowanych według Zasad zaproponowanych w pracy G. Tecklenburga (**Zasady I – VII**),
- modyfikacji głównych parametrów tych topologii według wytycznych zaproponowanych w pracy pana Tecklenburga (Tabela. 2 – *Explicit Parameters (Profile)*) – *Parametry Zewnętrzne*, przedstawione na rysunku 143c,
- podmianie *Powierzchni Bazowej* lub jej krawędzi w tych topologiach.

Tabela 2. Główne parametry wszystkich topologii procedur konstrukcyjnych dla strefy *Tylnego Słupka C*: przed ich modyfikacją (kolumna *Old*) i po ich modyfikacji (kolumna *New*) – na podstawie [53]

<b>Scenario C (C-Pillar)</b>	<b>Old</b>	<b>New</b>
<b>Reference geometries</b>		
<i>Rear Wall Upper Class A: 800 Z (Position rear window)</i>	3370 mm	3450 mm
<i>Rear Wall Upper Class A: 0 Z (Position rear window)</i>	45°	50°
<i>Side Wall Class A: 800 Z (Vehicle width)</i>	850 mm	900 mm
<i>Side Wall Class A: 1750 X (Position side wall)</i>	220 mm	200 mm
<b>Explicit Parameters (Profile)</b>		
<i>Length Flange Door Bedding Side Wall Outer (Długość Powierzchni Zewnętrznej Ściany Bocznej)</i>	25 mm	27 mm
<i>Length Flange Door Bedding Reinforcement (Długość Powierzchni Wzmocnienia)</i>	27 mm	29 mm
<i>Length Flange Door Bedding Side Wall Inner (Długość Powierzchni Wewnętrznej Ściany Bocznej)</i>	22 mm	25 mm
<i>Sheet Thickness Reinforcement C-Pillar (Grubość Komponentów Tylnego Słupka C)</i>	1,2 mm	1,6 mm

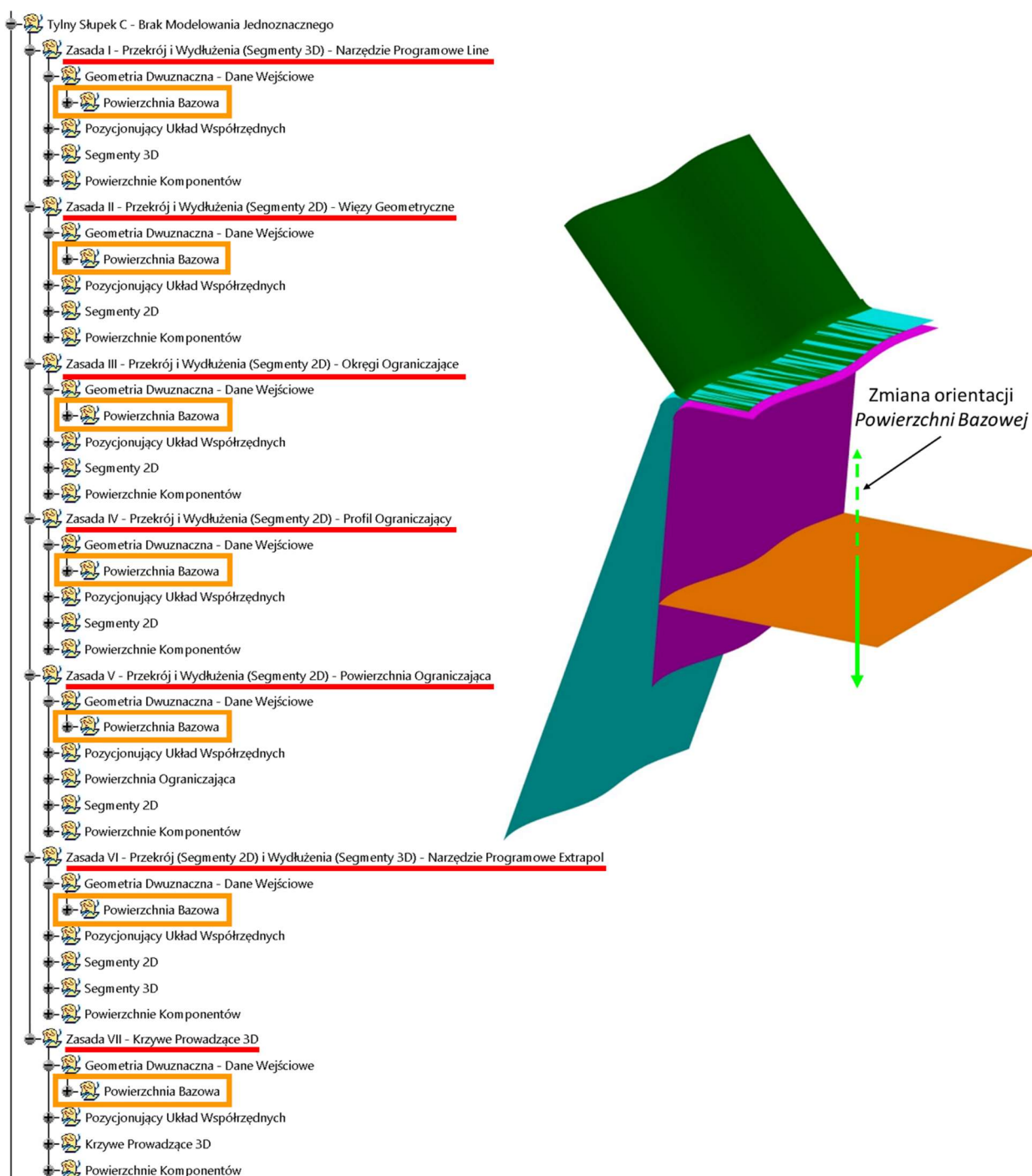
W celu uzyskania powtarzalnych, a tym samym wiarygodnych wyników weryfikacji badań, autor w inicjalnej próbie dokonał zmiany orientacji *Powierzchni Bazowej* początkowo utworzonych procedur konstrukcyjnych według siedmiu Zasad G. Tecklenburga, zmodyfikował *Parametry Zewnętrzne* ich topologii, a następnie przeprowadził po jedenaście Prób podmiany *Powierzchni Bazowej* lub jej krawędzi dla każdej z tych procedur. Po każdej podmianie autor ponownie zmieniał orientację tej powierzchni oraz modyfikował *Parametry Zewnętrzne* topologii przedstawione w Tabeli 2 (*Explicit Parameters (Profile)*) i na rysunku 143c. Łącznie zostało więc przeprowadzonych osiemdziesiąt cztery próby – po dwanaście dla każdej Zasady, wykorzystując do tego pięć *Powierzchni Bazowych* o różnej geometrii, składających się z jednego, jak i z kilku płatów powierzchni. Nawet jeśli w kilku próbach danej Zasady wykorzystana została ta sama powierzchnia, to za każdym razem wybierana była inna jej krawędź dla *Krzywej Bazowej* tej Zasady definiującej lokalizację końcowych powierzchni komponentów tworzących daną strefę karoserii samochodowej. Z uwagi na brak pierwotnych *Powierzchni Bazowych* wykorzystanych do transformacji geometrycznych badanych technik modelowania w pracy G. Tecklenburga, autor zdefiniował własne powierzchnie, przy czym, aby uwiarygodnić otrzymane wyniki dystans między podmienianymi powierzchniami sięgał ponad 1000 mm wobec maksymalnych 80 mm w przeprowadzonych przez G. Tecklenburga oryginalnych badanych, a różnica w ich położeniu kątowym znacznie przekraczała założone 5° (Tabela 2 – *Reference geometries*). Autor poprzez

ponad dwunastokrotne zwiększenie tego dystansu oraz losowe położenie kątowe podmienianych powierzchni chciał wykazać, że dla implementacji Modelowania Jednoznacznego do utworzonej topologii modelu CAD lokalizacja w przestrzeni i geometria nowych danych wejściowych tej topologii nie mają znaczenia. Na rysunku 145 przedstawiono każdą z pięciu *Powierzchni Bazowych* wraz z ich krawędziami, które zostały wykorzystane w dwunastu próbach dla siedmiu procedur konstrukcyjnych utworzonych w oparciu o Zasady (I – VII) zdefiniowane przez G. Tecklenburga.



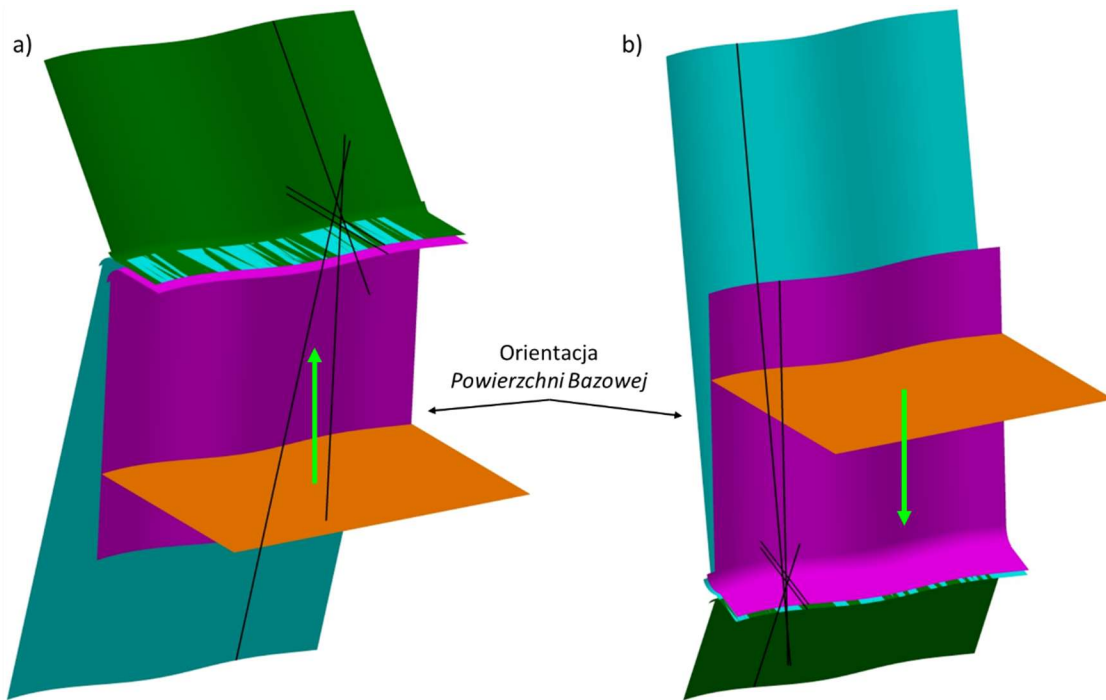
Rys. 145. Pięć *Powierzchni Bazowych* wykorzystanych w dwunastu *Próbach* dla siedmiu procedur konstrukcyjnych utworzonych w oparciu o Zasady (I – VII) zdefiniowane przez G. Tecklenburga; widoczny dystans między skrajnymi *Krzywymi Bazowymi* (1.1 i 4.4)

Aby uzyskać referencyjne wyniki dokonywanej weryfikacji, autor w pierwszej kolejności przeprowadził po jednej próbie zmiany orientacji *Powierzchni Bazowej* dla każdej procedury przygotowanej według rozpatrywanych Zasad, jednak bez implementacji Modelowania Jednoznacznego (rys. 146).



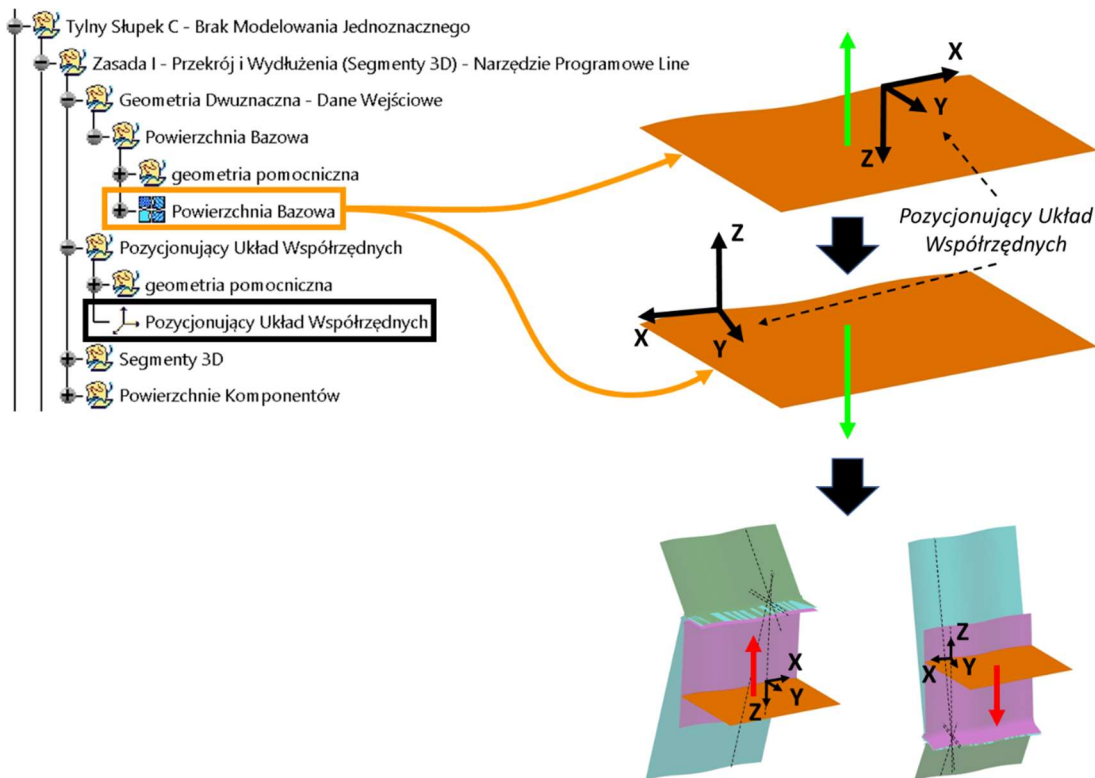
Rys. 146. Jedna próba zmiany orientacji *Powierzchni Bazowej* przeprowadzona dla każdej Zasady zdefiniowanej w pracy G. Tecklenburga bez implementacji Modelowania Jednoznacznego

Wszystkie próby, łącznie z Zasadą V (średnia ważona dla Kryterium 7, 8, 9 równa **1**) i Zasadą III (średnia ważona dla Kryterium 7, 8, 9 równa **3,89**), zakończyły się wynikiem negatywnym, bo położenie wygenerowanych powierzchni komponentów tworzących daną strefę karoserii samochodowej w stosunku do ich *Powierzchni Bazowej* zmieniło się na przeciwne. Ponadto, w związku ze zmianą punktu początkowego i punktu końcowego krawędzi danej *Powierzchni Bazowej*, będącej następstwem zmiany jej orientacji, nastąpiła zmiana położenia utworzonych na tej krawędzi przekrojów zbudowanych w oparciu o Zasady I – VI (rys. 147) oraz *Krzywych Prowadzących* zbudowanych w oparciu o Zasadę VII.



Rys. 147. Niezamierzony wpływ zmiany orientacji *Powierzchni Bazowej* na przekrój i na jego powierzchnie dla każdej Zasady zdefiniowanej w pracy G. Tecklenburga bez implementacji Modelowania Jednoznacznego: a) stan przed zmianą orientacji, b) stan po zmianie orientacji

Brak stabilności przygotowanych topologii procedur konstrukcyjnych bez implementacji Modelowania Jednoznacznego możliwy był do zaobserwowania już na etapie aktualizacji ich *Pozycjonującego Układu Współrzędnych*, w którym nastąpiła zmiana zwrotów kierunków wszystkich jego osi. Już na tym etapie autor mógł stwierdzić konsekwencje tej zmiany (rys. 148).

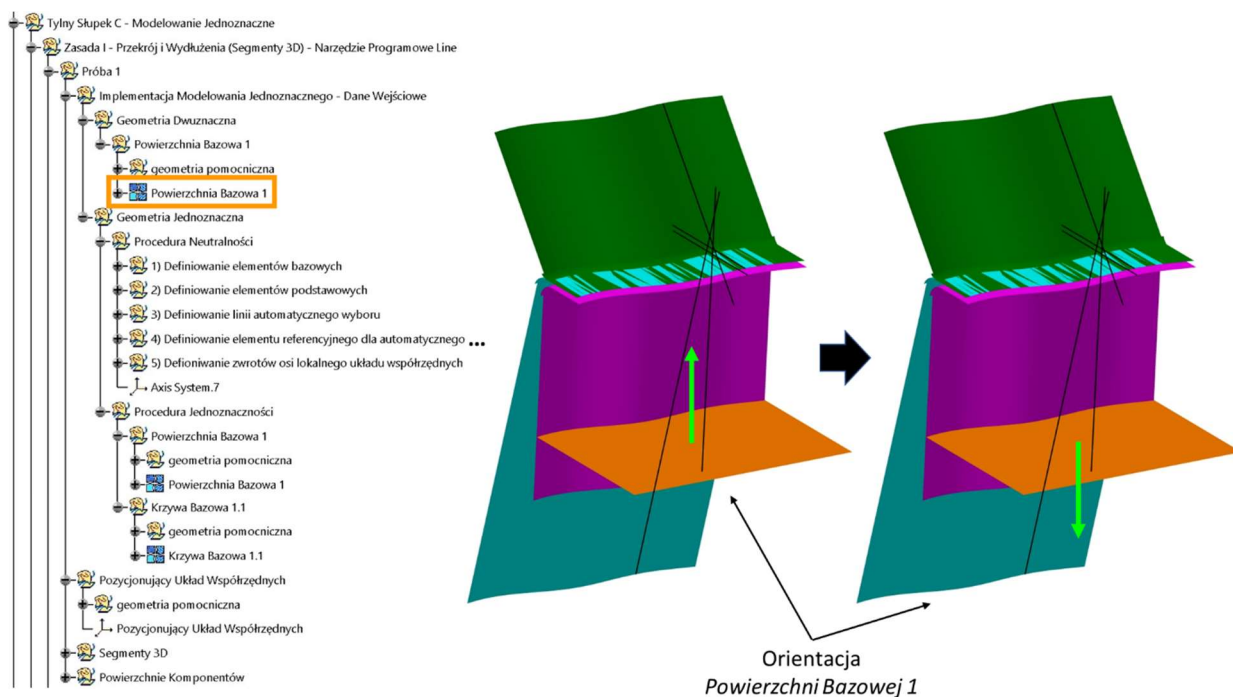


Rys. 148. Niezamierzony wpływ zmiany orientacji *Powierzchni Bazowej* na *Pozycjonujący Układ Współrzędnych*, a w konsekwencji na dalszą topologię danej procedury konstrukcyjnej



Tak jak w przypadku Wersji I *Trzpienia Pozycjonującego* rozpatrywanego w punkcie 4.4 Rozdziału 4, błędna interpretacja operacji modelowania przez system CAD badanych procedur konstrukcyjnych wynikająca z występującej w nich dwuznaczności geometrycznej nie powodowała natychmiastowego zatrzymania procesu aktualizacji modelu 3D. Była to więc ponownie bardziej niekorzystna sytuacja od utraty informacji na temat danych wejściowych tych operacji, a tym samym zatrzymania tego procesu na pierwszym napotkanym błędzie, bo zakładając, że ową aktualizację przeprowadzał konstruktor nie będący autorem badanych procedur, to w pierwszej kolejności musiał on odszukać w drzewie struktury modelu 3D przyczyny powstałych licznych nieprawidłowości, nie dających jednak do pewnego momentu żadnej informacji zwrotnej. Zatem proces aktualizacji badanych procedur konstrukcyjnych, w których nie zostało zaimplementowane Modelowanie Jednoznaczne wymagał od autora ingerencji, a tym samym dodatkowych nakładów pracy na poprawę tego procesu.

W następnej kolejności autor przeprowadził osiemdziesiąt cztery próby – po dwanaście dla każdej Zasady, w których zaimplementował Modelowanie Jednoznaczne. Dzięki Procedurze Neutralności i Procedurze Jednoznaczności możliwe stało się wyeliminowanie niezamierzonego wpływu zmiany orientacji *Powierzchni Bazowej* na *Pozycjonujący Układ Współrzędnych* w każdej przeprowadzonej próbie (rys. 149).



Rys. 149. Brak niezamierzonego wpływu zmiany orientacji *Powierzchni Bazowej* dzięki implementacji Modelowania Jednoznacznego na przykładzie procedury konstrukcyjnej, w której wykorzystano Zasadę I G. Tecklenburga w oparciu o *Powierzchnię Bazową 1* i jej *Krzywą Bazową 1.1*

W konsekwencji wykorzystanie autorskiej metodyki modelowania pozwoliło zoptymalizować badania G. Tecklenburga i zakończyć je wynikiem pozytywnym. Zmiana orientacji danych wejściowych, modyfikacja głównych parametrów i podmiana *Powierzchni Bazowej* lub jej krawędzi nie spowodowała wystąpienia komunikatu o możliwości pojawienia się w danej topologii dwuznaczności geometrycznej, ani żadnego innego wystąpienia błędnej interpretacji operacji modelowania przez system CAD uniemożliwiającej aktualizację modelu 3D. Oznacza to,

że zaktualizowane we wszystkich osiemdziesięciu czterech próbach końcowe powierzchnie komponentów tworzących strefę *Tylnego Słupka C* zachowały zdefiniowaną przez autora początkową ich geometrię, jak i ich początkowe położenie w stosunku do *Powierzchni Bazowej*, a sam proces aktualizacji dla każdej próby nie wymagał od autora dodatkowej ingerencji i przebiegał bezzwłocznie.

## 5 Wyniki badań

Rozdział ten zawiera stabelaryzowane wyniki badań weryfikacyjnych opisanych w punkcie 4.4 i punkcie 4.5 Rozdziału 4, poprzez które autor podjął próbę wykazania celowości zastosowania oraz skuteczności działania jego autorskiej metodyki Modelowania Jednoznacznego w procesie optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD. Autor poniższymi wynikami potwierdza pozytywny wpływ proponowanej metodyki na ten proces i udowadnia tezy niniejszej rozprawy doktorskiej postawione w Rozdziale 1. Jednocześnie wyniki te stanowią wyraźny sygnał dla sfery inżynierskiej, naukowej, a przede wszystkim gospodarczej do zmiany podejścia do procesu projektowo-konstrukcyjnego, tak by techniki tworzenia modeli CAD stały się w nim równie ważne, jak efekt końcowy tych technik, a kadry inżynierskie i managerskie tworzące zintegrowane zespoły projektowe były w pełni świadome konsekwencji odpowiedniego ich wyboru.

### 5.1 Implementacja Modelowania Jednoznacznego do topologii modelu CAD

Wyniki badań przeprowadzonych na przykładowym modelu CAD – trzpieniu pozycjonującym przedstawiono w poniższych tabelach. Każda tabela odnosi się do jednej wersji trzpienia, który został poddany trzem transformacjom geometrycznym opisanym w punkcie 4.4 Rozdziału 4.

Tabela 3. Transformacja 1 Wersji I trzpienia pozycjonującego – bez implementacji Modelowania Jednoznacznego

Transformacja 1 - Wersja I trzpienia pozycjonującego						
Próba			Wystąpienie komunikatu o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wystąpienie błędu wynikającego z utraty informacji na temat danych wejściowych	Wystąpienie odwrotnej interpretacji danych wejściowych przez system CAD wynikającej z pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wynik
Przemieszczenia wzdłuż osi X, Y i Z Kartezjańskiego układu współrzędnych	1	X=50, Y=0, Z=0	tak	nie	nie	pozytywny
	2	X=0, Y=50, Z=0	tak	nie	nie	pozytywny
	3	X=0, Y=0, Z=50	tak	nie	nie	pozytywny
	4	X= - 50, Y=0, Z=0	tak	nie	nie	pozytywny
	5	X=0, Y= - 50, Z=0	tak	nie	nie	pozytywny
	6	X=0, Y=0, Z= - 50	tak	nie	nie	pozytywny
Przemieszczenia w oktantach Kartezjańskiego układu współrzędnych	1	X=50, Y=50, Z=50	tak	nie	nie	pozytywny
	2	X= - 50, Y=50, Z=50	tak	nie	nie	pozytywny
	3	X=50, Y= - 50, Z=50	tak	nie	nie	pozytywny
	4	X=50, Y=50, Z= - 50	tak	nie	nie	pozytywny
	5	X=50, Y= - 50, Z= - 50	tak	nie	nie	pozytywny
	6	X= - 50, Y=50, Z= - 50	tak	nie	nie	pozytywny
	7	X= - 50, Y= - 50, Z=50	tak	nie	nie	pozytywny
	8	X= - 50, Y= - 50, Z= - 50	tak	nie	nie	pozytywny

Wszystkie przemieszczenia w Transformacji 1 Wersji I trzpienia zakończyły się wynikiem pozytywnym. Model 3D w docelowych położeniach zachował stabilność topologiczną i geometryczną, jednak w każdej próbie wystąpił komunikat o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności. Oznacza to, że pomimo pozytywnych wyników badań autora, wprowadzenie innych niż w przeprowadzonych próbach wartości współrzędnych X, Y, Z *Kartezjańskiego układu współrzędnych* mogłyby spowodować wystąpienie faktycznej dwuznaczności, a w konsekwencji

błędnej interpretacji operacji modelowania przez system CAD uniemożliwiającej aktualizację modelu 3D.

Tabela 4. Transformacja 1 Wersji II trzpienia pozycjonującego – z implementacją Modelowania Jednoznacznego

Transformacja 1 - Wersja II trzpienia pozycjonującego (Modelowanie Jednoznaczne)						
Próba			Wystąpienie komunikatu o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wystąpienie błędu wynikającego z utraty informacji na temat danych wejściowych	Wystąpienie odwrotnej interpretacji danych wejściowych przez system CAD wynikającej z pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wynik
Przemieszczenia wzdłuż osi X, Y i Z Kartezjańskiego układu współrzędnych	<b>1</b>	1. X=50, Y=0, Z=0	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>2</b>	2. X=0, Y=50, Z=0	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>3</b>	3. X=0, Y=0, Z=50	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>4</b>	4. X= - 50, Y=0, Z=0	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>5</b>	5. X=0, Y= - 50, Z=0	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>6</b>	6. X=0, Y=0, Z= - 50	nie	nie	nie	pozytywny
Przemieszczenia w oktantach Kartezjańskiego układu współrzędnych	<b>1</b>	1. X=50, Y=50, Z=50	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>2</b>	2. X= - 50, Y=50, Z=50	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>3</b>	3. X=50, Y= - 50, Z=50	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>4</b>	4. X=50, Y=50, Z= - 50	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>5</b>	5. X=50, Y= - 50, Z= - 50	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>6</b>	6. X= - 50, Y=50, Z= - 50	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>7</b>	7. X= - 50, Y= - 50, Z=50	nie	nie	nie	pozytywny
	<b>8</b>	8. X= - 50, Y= - 50, Z= - 50	nie	nie	nie	pozytywny

Wszystkie przemieszczenia w Transformacji 1 Wersji II trzpienia zakończyły się wynikiem pozytywnym. Model 3D w docelowych położeniach zachował stabilność topologiczną i geometryczną oraz w żadnej próbie nie wystąpił komunikat o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności lub o innym błędzie. Oznacza to, że wprowadzenie innych niż w przeprowadzonych próbach wartości współrzędnych X, Y, Z *Kartezjańskiego układu współrzędnych* nie spowodowałyby wystąpienia faktycznej dwuznaczności, a w konsekwencji błędnej interpretacji operacji modelowania przez system CAD uniemożliwiającej aktualizację modelu 3D.

Tabela 5. Transformacja 2 Wersji I trzpienia pozycjonującego – bez implementacji Modelowania Jednoznacznego

Transformacja 2 - Wersja I trzpienia pozycjonującego							
Próba			Wystąpienie komunikatu o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wystąpienie błędu wynikającego z utraty informacji na temat danych wejściowych	Wystąpienie odwrotnej interpretacji danych wejściowych przez system CAD wynikającej z pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wynik	
Obrót względem osi X lokalnego układu współrzędnych <i>Obrót wokół osi X</i>	1	40°	tak	nie	nie	pozytywny	
	2	160°	Wariant I	nie	tak	nie	negatywny
			Wariant II	tak	nie	tak	negatywny
3	280°	nie	tak	nie	negatywny		
Obrót względem osi Y lokalnego układu współrzędnych <i>Obrót wokół osi Y</i>	4	40°	tak	nie	nie	pozytywny	
	5	160°	Wariant I	tak	tak	nie	negatywny
			Wariant II	tak	nie	tak	negatywny
6	280°	tak	tak	nie	negatywny		
Obrót względem osi Z lokalnego układu współrzędnych <i>Obrót wokół osi Z</i>	7	40°	tak	nie	nie	pozytywny	
	8	160°	Wariant I	tak	tak	nie	negatywny
			Wariant II	tak	nie	tak	negatywny
9	280°	tak	tak	nie	negatywny		

Tylko trzy z przeprowadzonych dziewięciu prób w Transformacji 2 Wersji I trzpienia zakończyły się pozytywnie. Obrót modelu 3D o 40° względem osi X, Y i Z lokalnych układów współrzędnych nie spowodował braku jego stabilności topologicznej i geometrycznej, jednak występujący w każdej z udanych prób komunikat o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności oznaczał, że dla innych wartości obrotu istnieje ryzyko wystąpienia faktycznej dwuznaczności. Kolejne próby obrotu trzpienia urzeczywistniły to ryzyko, a w konsekwencji system CAD utracił informacje na temat danych wejściowych poszczególnych operacji modelowania lub błędnie je zinterpretował, co uniemożliwiło ukończenie aktualizacji modelu 3D.

Tabela 6. Transformacja 2 Wersji II trzpienia pozycjonującego – z implementacją Modelowania Jednoznacznego

Transformacja 2 - Wersja II trzpienia pozycjonującego (Modelowanie Jednoznacznego)							
Próba			Wystąpienie komunikatu o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wystąpienie błędu wynikającego z utraty informacji na temat danych wejściowych	Wystąpienie odwrotnej interpretacji danych wejściowych przez system CAD wynikającej z pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wynik	
Obrót względem osi X lokalnego układu współrzędnych <i>Obrót wokół osi X</i>	1	40°	nie	nie	nie	pozytywny	
	2	160°	Wariant I	nie	nie	nie	pozytywny
			Wariant II	nie	nie	nie	pozytywny
3	280°	nie	nie	nie	pozytywny		
Obrót względem osi Y lokalnego układu współrzędnych <i>Obrót wokół osi Y</i>	4	40°	nie	nie	nie	pozytywny	
	5	160°	Wariant I	nie	nie	nie	pozytywny
			Wariant II	nie	nie	nie	pozytywny
6	280°	nie	nie	nie	pozytywny		
Obrót względem osi Z lokalnego układu współrzędnych <i>Obrót wokół osi Z</i>	7	40°	nie	nie	nie	pozytywny	
	8	160°	Wariant I	nie	nie	nie	pozytywny
			Wariant II	nie	nie	nie	pozytywny
9	280°	nie	nie	nie	pozytywny		

Wszystkie obroty w Transformacji 2 Wersji II trzpienia zakończyły się wynikiem pozytywnym. Model 3D w docelowych położeniach zachował stabilność topologiczną i geometryczną oraz w żadnej próbie nie wystąpił komunikat o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności lub o innym błędzie. Oznacza to, że wprowadzenie innych niż w przeprowadzonych próbach wartości kątowych dla osi X, Y, Z lokalnych układów współrzędnych nie spowodowałyby wystąpienia faktycznej dwuznaczności, a w konsekwencji błędnej interpretacji operacji modelowania przez system CAD uniemożliwiającej aktualizację modelu 3D.

Tabela 7. Transformacja 3 Wersji I trzpienia pozycjonującego – bez implementacji Modelowania Jednoznacznego

Transformacja 3 - Wersja I trzpienia pozycjonującego						
Próba		Wystąpienie komunikatu o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wystąpienie błędu wynikającego z utraty informacji na temat danych wejściowych	Wystąpienie odwrotnej interpretacji danych wejściowych przez system CAD wynikającej z pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wystąpienie błędnej interpretacji operacji modelowania przez system CAD uniemożliwiającej aktualizację modelu 3D	Wynik
Seria I: <i>Nowe Dane Wejściowe</i> w zmienionym położeniu	1	nie	tak	nie	tak	negatywny
	2	nie	tak	nie	tak	negatywny
	3	nie	tak	nie	tak	negatywny
Seria II: <i>Nowe Dane Wejściowe</i> w zmienionym położeniu i ze zmienioną orientacją	1	nie	tak	nie	tak	negatywny
	2	nie	tak	nie	tak	negatywny
	3	nie	tak	nie	tak	negatywny

Wszystkie próby podmiany danych wejściowych w Transformacji 3 Wersji I trzpienia zakończyły się wynikiem negatywnym. Model 3D w docelowych położeniach nie zachował stabilności topologicznej i geometrycznej, a system CAD wyświetlał komunikat o utracie informacji na temat danych wejściowych dla poszczególnych operacji modelowania i o ich błędnej interpretacji uniemożliwiającej aktualizację modelu 3D.

Tabela 8. Transformacja 3 Wersji II trzpienia pozycjonującego – z implementacją Modelowania Jednoznacznego

Transformacja 3 - Wersja II trzpienia pozycjonującego (Modelowanie Jednoznacznego)						
Próba		Wystąpienie komunikatu o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wystąpienie błędu wynikającego z utraty informacji na temat danych wejściowych	Wystąpienie odwrotnej interpretacji danych wejściowych przez system CAD wynikającej z pojawienia się imiennej dwuznaczności	Wystąpienie błędnej interpretacji operacji modelowania przez system CAD uniemożliwiającej aktualizację modelu 3D	Wynik
Seria I: <i>Nowe Dane Wejściowe</i> w zmienionym położeniu	1	nie	nie	nie	nie	pozytywny
	2	nie	nie	nie	nie	pozytywny
	3	nie	nie	nie	nie	pozytywny
Seria II: <i>Nowe Dane Wejściowe</i> w zmienionym położeniu i ze zmienioną orientacją	1	nie	nie	nie	nie	pozytywny
	2	nie	nie	nie	nie	pozytywny
	3	nie	nie	nie	nie	pozytywny

Wszystkie próby podmiany danych wejściowych w Transformacji 3 Wersji II trzpienia zakończyły się wynikiem pozytywnym. Model 3D w docelowych położeniach zachował stabilność topologiczną i geometryczną oraz w żadnej próbie nie wystąpił komunikat o możliwości pojawienia się imiennej dwuznaczności lub o innym błędzie. Oznacza to, że podmiana każdego z innych danych wejściowych w każdym innym położeniu w przestrzeni nie spowodowałyby wystąpienia faktycznej dwuznaczności, a w konsekwencji błędnej interpretacji operacji modelowania przez system CAD uniemożliwiającej aktualizację modelu 3D.

Powyższe wyniki badań potwierdzają, że tylko jednoznaczne zdefiniowanie orientacji danych wejściowych modelu CAD zapewnia stabilność topologiczną i geometryczną podczas jego transformacji geometrycznych. Nawet jeśli topologia modelu zachowuje tę stabilność w określonym położeniu w przestrzeni, to bez zaimplementowania do niej wytycznych Modelowania Jednoznacznego istnieje duże ryzyko, że w innym położeniu ją utraci. Takie ryzyko było obecne podczas Transformacji 1 i 2 trzpienia pozycjonującego, których wyniki przedstawiono w Tabeli 3 i 5. Jeśli więc konsekwencją modyfikacji istniejących w topologii modelu 3D danych wejściowych może być bezpośredni wpływ na błędną interpretację tej topologii przez system CAD, to ich faktyczna podmiana i jednoczesna wynikająca z tego zmiana położenia modelu prowadzi do tej błędnej interpretacji, o ile nie zostaną zaimplementowane wytyczne Modelowania Jednoznacznego. Taka sytuacja miała miejsce w Transformacji 3 trzpienia pozycjonującego, których wyniki przedstawiono w Tabeli 7. Tym samym autor przeprowadzonymi badaniami udowodnił Tezę 1 i Tezę 2 niniejszej rozprawy doktorskiej.

## 5.2 Implementacja Modelowania Jednoznacznego do badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD

Rezultaty implementacji Modelowania Jednoznacznego do badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD opisanych w punkcie 4.5 Rozdziału 4 przedstawiono w Tabeli 9. Z uwagi na dużą liczbę przeprowadzonych prób (osiemdziesiąt cztery) oraz ich identyczne wyniki, większość z nich (próby 2 – 12 dla każdej Zasady) została zaprezentowana w formie jednej pozycji tej tabeli.

W związku z przeprowadzoną weryfikacją badań zawartych w pracy doktorskiej G. Tecklenburga (patrz: punkt 4.5 Rozdz. 4) autor zaproponował zmianę oceny badanych procedur konstrukcyjnych w kategorii dotyczącej stabilności strukturalnej modelu 3D (ang. *Update stability*) dla następujących Kryteriów:

- Kryterium 7 – Stabilność aktualizacji – Więzy geometryczne (ang. *Update stability – Geometrical constrains*): we wszystkich przeprowadzonych osiemdziesięciu czterech próbach transformacji geometrycznych modyfikacja więzów geometrycznych nie spowodowała wystąpienia komunikatów i błędów wynikających z dwuznaczności geometrycznej, która to dwuznaczność została wyeliminowana z badanych procedur – **proponowana ocena autora: 1**,
- Kryterium 8 – Stabilność aktualizacji – nakład pracy potrzebny do edycji drzewa struktury modelu 3D lub jego cech geometrycznych (ang. *Update stability – effort to edit tree or features*): z uwagi na brak wystąpienia komunikatów i błędów wynikających z dwuznaczności geometrycznej w badanych procedurach, we wszystkich przeprowadzonych osiemdziesięciu czterech próbach ich transformacji geometrycznych nie było konieczności poświęcania dodatkowego nakładu pracy na edycję ich topologii – **proponowana ocena autora: 1**,
- Kryterium 9 – Stabilność aktualizacji podczas podmiany *Powierzchni Bazowej* (ang. *Update stability when references are altered*): we wszystkich przeprowadzonych osiemdziesięciu czterech próbach transformacji geometrycznych proces podmiany *Powierzchni Bazowej* badanych procedur nie spowodował wystąpienia ich niestabilności strukturalnej – **proponowana ocena autora: 1**.

Proponowane oceny zostały dodane do wyników badań G. Tecklenburga i zaprezentowane w Tabeli 10.

Tabela 9. Transformacje geometryczne modelu 3D *Tylnego Słupka C* – weryfikacja badań z implementacją Modelowania Jednoznacznego

Transformacje geometryczne modelu 3D <i>Tylnego Słupka C</i> – weryfikacja badań z implementacją Modelowania Jednoznacznego							
Próba		podmiana <i>Powierzchni Bazowej</i> lub jej krawędzi		zmiana orientacji <i>Powierzchni Bazowej</i>		modyfikacja <i>Parametrów Zewnętrznych</i> (Wieżów Geometrycznych)	Wynik
Procedura konstrukcyjna utworzona przy użyciu <b>Zasady I</b> (Przekrój i Wydłużenia (Segmety 3D) – Narzędzie Programowe Line)	1 (inicjalna)	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	nd.	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	nd.	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
	2 -12	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
Procedura konstrukcyjna utworzona przy użyciu <b>Zasady II</b> (Przekrój i Wydłużenia (Segmety 2D) – Wieży Geometryczne)	1 (inicjalna)	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	nd.	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	nd.	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
	2 -12	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
Procedura konstrukcyjna utworzona przy użyciu <b>Zasady III</b> (Przekrój i Wydłużenia (Segmety 2D) – Okręgi Ograniczające)	1 (inicjalna)	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	nd.	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	nd.	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
	2 -12	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
Procedura konstrukcyjna utworzona przy użyciu <b>Zasady IV</b> (Przekrój i Wydłużenia (Segmety 2D) – Profil Ograniczający)	1 (inicjalna)	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	nd.	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	nd.	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
	2 -12	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
Procedura konstrukcyjna utworzona przy użyciu <b>Zasady V</b> (Przekrój i Wydłużenia (Segmety 2D) – Powierzchnia Ograniczająca)	1 (inicjalna)	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	nd.	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	nd.	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
	2 -12	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
Procedura konstrukcyjna utworzona przy użyciu <b>Zasady VI</b> (Przekrój (Segmety 2D) i Wydłużenia (Segmety 3D) – Narzędzie Programowe Extrapolate)	1 (inicjalna)	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	nd.	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	nd.	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
	2 -12	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
Procedura konstrukcyjna utworzona przy użyciu <b>Zasady VII</b> (Krzywe Prowadzące 3D)	1 (inicjalna)	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	nd.	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	nd.	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny
	2 -12	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0	komunikaty o dwuznaczności geometrycznej:	0 pozytywny
		błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0	błędy geometryczne/topologiczne:	0 pozytywny



Tabela 10. Proponowana zmiana oceny dla Kryterium 7, 8, 9 wynikająca z implementacji Modelowania Jednoznacznego do weryfikowanych Zasad – na podstawie [53]

No.	PRINCIPLE	Weighting	I	II	III	IV	V	VI	VII
			True section methode - 3D only	True section methode - geometrical constraints	True section methode - boundary circle	True section methode - boundary box	True section methode - boundary box (surface)	True section methode - extrapolation 3D	Surface band methode
	Evaluation criteria		Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating
	<b>Ease of use</b>								
1	Ease of use for simply profiles	1,82%	1	2	2	2	2	1	1
2	Ease of use for complex profiles	3,64%	4	3	5	2	1	2	4
3	Ease of use for segment extension	10,91%	4	5	5	3	2	3	3
4	Ease of use - number of design steps	9,09%	3	2	1	1	2	2	5
	<b>Traceability</b>								
5	Traceability for third parties	12,73%	1	2	5	1	1	1	2
6	Traceability - clear arrangement structural tree	7,27%	3	1	2	1	3	2	4
	<b>Update stability</b>								
7	Update stability - Geometrical constraints	14,55%	1	4	1	5	1	2	1
8	Update stability - Effort to edit tree or features	18,18%	4	1	2	1	1	3	5
9	Update stability when references are altered	16,36%	1	4	1	5	1	2	1
10	<b>Effort reduction by replication</b>	5,45%	5	1	5	2	1	5	5
	<b>Final score</b>	<b>100,00%</b>	<b>2,53</b>	<b>2,85</b>	<b>3,82</b>	<b>2,09</b>	<b>1,36</b>	<b>2,31</b>	<b>2,98</b>

Proponowana zmiana oceny dla Kryterium 7, 8, 9 wynikająca z implementacji Modelowania Jednoznacznego do weryfikowanych Zasad

Po wyrównaniu ocen dotyczących stabilności strukturalnej badanych modeli 3D dla każdej Zasady tworzącej ich procedurę konstrukcyjną i przeliczeniu średnich ważonych z ocen dla wszystkich kategorii najefektywniejszą techniką modelowania okazała się ta, w której wykorzystano *Zasadę IV – Przekrój i Wydłużenia (Segmenty 2D) – Profil Ograniczający* (ang. *Principle IV – True section method - boundary box*). Technika modelowania, w której wykorzystano *Zasadę V* zajęła drugie miejsce (poprzednio pierwsze miejsce), natomiast dla *Zasady I* i *II* nastąpiła zamiana miejsc (4 miejsce dla *Zasady II*, 5 miejsce dla *Zasady I*) (Tabela 11).

Tabela 11. Zmiana kolejności weryfikowanych Zasad: I, II, IV i V pod względem ich efektywności z zaimplementowanym Modelowaniem Jednoznacznym w porównaniu do wyników przed jego implementacją (patrz: punkt 4.5 Rozdz. 4, Tabela 1) – na podstawie [53]

PRINCIPLE			I True section methode - 3D only	II True section methode - geometrical constraints	III True section methode - boundary circle	IV True section methode - boundary box	V True section methode - boundary box (surface)	VI True section methode - extrapolation 3D	VII Surface band methode
No.	Evaluation criteria	Weighting	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating
<b>Ease of use</b>									
1	Ease of use for simply profiles	1,82%	1	2	2	2	2	1	1
2	Ease of use for complex profiles	3,64%	4	3	5	2	1	2	4
3	Ease of use for segment extension	10,91%	4	5	5	3	2	3	3
4	Ease of use - number of design steps	9,09%	3	2	1	1	2	2	5
<b>Traceability</b>									
5	Traceability for third parties	12,73%	1	2	5	1	1	1	2
6	Traceability - clear arrangement structural tree	7,27%	3	1	2	1	3	2	4
<b>Update stability</b>									
7	Update stability - Geometrical constraints	14,55%	1	1	1	1	1	1	1
8	Update stability - Effort to edit tree or features	18,18%	1	1	1	1	1	1	1
9	Update stability when references are altered	16,36%	1	1	1	1	1	1	1
10	<b>Effort reduction by replication</b>	5,45%	5	1	5	2	1	5	5
<b>Final score</b>		<b>100,00%</b>	<b>1,98</b>	<b>1,75</b>	<b>2,40</b>	<b>1,33</b>	<b>1,36</b>	<b>1,64</b>	<b>2,25</b>
			<b>5</b>	<b>4</b>		<b>1</b>	<b>2</b>		

Wszystkie modele 3D wygenerowane w osiemdziesięciu czterech próbach przy użyciu zaproponowanych przez G. Teckleburga technik modelowania i transformacji geometrycznych z zaimplementowanym Modelowaniem Jednoznacznym zachowały stabilność topologiczną i geometryczną podczas procesu ich aktualizacji. Implementacja Modelowania Jednoznacznego wyeliminowała potrzebę ingerencji w topologię modelu 3D w celu przywrócenia początkowych kryteriów wyboru, a więc wyeliminowała dodatkowy nakład pracy jaki konstruktor musiałby na tę ingerencję ponieść. Tym samym autor przeprowadzoną weryfikacją badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD udowodnił Tezę 3 i Tezę 4 niniejszej rozprawy doktorskiej. Chciałby on jednak w tym miejscu zaznaczyć, że dane wejściowe tej weryfikacji nie były pełne (między innymi brak detalicznych opisów dotyczących *Tylnego Rejonu Dachy* i *Bocznego Rejonu Dachy* w tekstowej formie pracy G. Tecklenburga) w związku z tym w przypadku dostępu do pełnych danych wejściowych weryfikację tę należałoby powtórzyć. Wtedy też byłaby możliwość zaproponowania nowych ocen dla pozostałych Kryteriów badań. Z drugiej strony należy zwrócić uwagę, że wyeliminowanie różnicy w średniej ważonej tylko dla jednej Kategorii: Stabilność Aktualizacji (ang. *Update stability*), ponad dwukrotnie zmniejszyło rozbieżność w jej końcowym wyniku między najbardziej efektywną, a najmniej efektywną techniką modelowania rozpatrywanego fragmentu strefy karoserii samochodowej (rozbieżność przed implementacją Modelowania Jednoznacznego: **2,46**; rozbieżność po implementacji Modelowania Jednoznacznego: **1,07**). Zatem autor przeprowadzoną weryfikacją badań G. Teckleburga zaprezentował potencjalną skalę korzyści wynikającą z implementacji proponowanej metodyki optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD.

## 6 Podsumowanie i wnioski

W opinii autora rozwój technik tworzenia modeli w systemach komputerowego wspomaganie projektowania był i nadal jest umotywowany dążeniem człowieka do realizacji uniwersalnych idei związanych z chęcią zaspokojenia jednej z fundamentalnych jego potrzeb – potrzeby samorealizacji. Idee te polegają na chęci dokonania wkładu w danej dziedzinie dla dobra ogółu, jak i wkładu we własne życie dla dobra własnego, zatem mogą być związane między innymi z dążeniem do:

- odnalezienia optymalnego rozwiązania biorąc pod uwagę przyjęte kryteria wyboru,
- zdobywania nowych doświadczeń i umiejętności,
- bezpieczeństwa,
- czynienia rzeczy skomplikowanych prostszymi,
- czynienia rzeczy trudnych łatwiejszymi...

Autor przedstawioną w niniejszej rozprawie doktorskiej metodyką optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD wykazał możliwość dalszego rozwoju technik modelowania w systemach klasy CAX, a tym samym podjął próbę przybliżenia człowieka do realizacji powyższych idei. Interesującym jest fakt, że rozwój ten może być dokonany w oparciu o istniejące już środki w postaci obecnych na rynku systemów CAD – bez konieczności inwestycji w nowe rozwiązania. Nawet jeśli nie wszystkie z tych systemów w swojej obecnej wersji udostępniają ich użytkownikom wykorzystane w proponowanej metodyce narzędzia programowe, to funkcjonalność tych narzędzi bazująca na podstawowych założeniach każdego współczesnego parametrycznego systemu CAD nie powinna być przeszkodą, aby je wprowadzić do kolejnych wersji tych systemów.

Drugą interesującą kwestią jest fakt, że ów potencjalny rozwój nie jest związany z coraz popularniejszą koncepcją polegającą na integracji systemów klasy CAX do postaci głównych jednostek zarządzania danymi i całym przedsiębiorstwem, a więc systemów PLM (ang. *Product Lifecycle Management*), ani z Projektowaniem opartym o zaawansowane rozwiązania tych systemów Bazującym na Wiedzy (ang. *Knowledge-Based Design – KBD*), lecz nastawiony jest na wykorzystanie fundamentalnych zasad tworzenia modeli 3D przy użyciu podstawowych narzędzi programowych. Zdając sobie sprawę z niewątpliwej słuszności implementacji wspomnianych systemów PLM do sfery gospodarczej, autor jednocześnie wskazuje alternatywny sposób tej implementacji, który polegałby na dodatkowej edukacji kadry inżynierskiej w kierunku przedstawionych w niniejszej rozprawie technik tworzenia modeli 3D i na zwiększeniu świadomości kadry managerskiej w kierunku istotności tych technik w procesie projektowo-konstrukcyjnym. Działania te miałyby na celu zwiększenie integracji tych dwóch sfer, co w konsekwencji pozwoliłoby w przyszłości na efektywniejsze zarządzanie cyklem życia produktu. Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że te dodatkowe kroki przygotowawcze wiązałyby się z wydłużeniem procesu wdrażania systemów PLM. Jednak w opinii autora w przypadku tak kosztownych procesów wdrożeniowych, wymagających wiele pracy i czasu ze strony całej kadry zarządzającej danym przedsiębiorstwem, warto jest skupić się w pierwszej kolejności na podstawach danego rozwiązania, by w następstwie w pełni wykorzystać jego potencjał.

Wykonane przez autora badania (patrz: punkt 4.4 i 4.5 Rozdz. 4) potwierdziły skuteczność jego autorskiej metodyki Modelowania Jednoznacznego. Na uwagę zasługują zwłaszcza wyniki badań weryfikacyjnych nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD nie wchodzących

w bezpośredni skład Modelowania Jednoznacznego (patrz: punkt 5.2 Rozdz. 5), a więc nie będących technikami zalecanymi przez autora. Okazało się bowiem, że implementacja Modelowania Jednoznacznego do tych technik wyrównała ich stabilność topologiczną i w znaczący sposób zbliżyła efektywność każdej z nich. Zaobserwowane spostrzeżenia są o tyle interesujące, że obecnie większość producentów marek motoryzacyjnych, jeśli nie wszyscy, wykorzystuje w koncepcyjnej fazie tworzenia karoserii samochodowej technikę, która w oryginalnych badaniach G. Tecklenburga była tą najbardziej efektywną. Tymczasem autor poprzez weryfikację badań G. Tecklenburga wykazał w tej kwestii wyższość innej techniki. Zatem w pierwszej kolejności należy zauważyć, że istnieje szerokie pole do implementacji Modelowania Jednoznacznego w samej gałęzi przemysłu motoryzacyjnego, by w konsekwencji powtórnie ustanowić uniwersalną metodykę tworzenia modeli 3D, która znalazłaby szerokie zastosowanie u producentów samochodów. W drugiej kolejności należy zauważyć, że potencjalnie każda obecnie stosowana technika tworzenia modeli CAD w potencjalnie każdej gałęzi przemysłu może zostać poddana optymalizacji pod kątem zaimplementowania Modelowania Jednoznacznego w celu zwiększenia jej stabilności topologicznej, a tym samym zwiększenia jej efektywności.

Dalszy rozwój technik tworzenia modeli CAD i rozwój samego Modelowania Jednoznacznego powinien w opinii autora uwzględniać ich połączenie z Projektowaniem Bazującym na Wiedzy (KBD), a w następnej kolejności z Rozwojem Produktu Bazującym na Wiedzy (ang. *Knowledge-Based Engineering – KBE*) (patrz: punkt 3.1 Rozdz. 3, Schemat 1). Wykorzystanie w jednoznacznie geometrycznych asocjatywnych modelach CAD elementów tego rodzaju projektowania, takich jak: formuły, reguły, sprawdzenia czy relacje, otworzy drogę do dalszej optymalizacji struktury tych modeli, by uzyskane w ten sposób autogenerujące modele [44] pozwoliły przedstawicielom sfery inżynierskiej na usprawnienie automatyzacji procesu związanego z rozwojem produktu. Zagadnienie to jest na tyle złożone, że należałoby poczynić w jego kierunku odrębne badania, a wyniki tych badań przedstawić w kolejnej pracy naukowej.

Czy są zatem jakieś ryzyka, jakie niesie za sobą implementacja Modelowania Jednoznacznego do topologii modeli CAD? Według autora proponowana metodyka w formie, jaka została zaprezentowana w niniejszej pracy, a także w przyszłej formie, w której nastąpi jej integracja z Projektowaniem i Rozwojem Produktu Bazującym na Wiedzy ryzyka za sobą nie niesie. Oczywiście można wysunąć tezę, według której skrócony czas potrzebny na proces projektowo-konstrukcyjny i zwiększony stopień automatyzacji tworzenia struktur asocjatywnych modeli CAD spowodowany implementacją Modelowania Jednoznacznego zmniejszy zapotrzebowanie na specjalistów z zakresu ich tworzenia. Nie można jednak hamować postępu technologicznego człowieka tylko dlatego, że spowoduje on potrzebę zmiany wymaganych kwalifikacji, na przykład na stanowisko konstruktora. To w naturze człowieka powinna być chęć do nieustannego rozwoju, poszerzania własnych kwalifikacji, a tym samym czynienia siebie i innych lepszym. Zatem ograniczenie lub eliminacja niedoskonałości danego procesu, jakim w badanym przypadku jest optymalizacja struktury asocjatywnych modeli CAD, powinna być rozpatrywana raczej w kontekście szansy dla sfery inżynierskiej na ogólnie pojęty rozwój zawodowy, niż w kontekście próby redukcji liczby najważniejszych jednostek tego procesu jakim są i powinni być ludzie.

Inaczej w opinii autora należy podchodzić do ostatniej zaproponowanej przez niego fazy rozwoju technik modelowania, w której do Modelowania Jednoznacznego nastąpi implementacja algorytmów sztucznej inteligencji (patrz: punkt 3.1 Rozdz. 3, Schemat 1). Rok opracowywania niniejszej rozprawy jest rokiem przełomowym w kwestii wdrażania sztucznej inteligencji (ang. *Artificial Intelligence – AI* [17]) do życia człowieka. Potencjał i możliwości w kwestii wsparcia

w jego życiu codziennym jakie się z tym faktem wiązą jeszcze kilka lat temu były rozpatrywane w kategorii domysłów i pozostawały w sferze naukowej fikcji. Jednak oprócz wynikającego z tego tytułu pozytywnego wpływu, jaki niewątpliwie ludzkość doświadczy, coraz częściej mówi się o eliminacji niektórych zawodów, które już w tej chwili mogą być wykonywane przez sztuczną inteligencję. Na początku maja 2023 roku świat obiegła informacja o odejściu z firmy Google pioniera w kwestii rozwoju algorytmów sztucznej inteligencji – Geoffreya Hintona [13]. Po dziesięciu latach pracy między innymi nad projektem tak zwanego „chatbota” G. Hinton na łamach amerykańskiej gazety New York Times w taki sposób skomentował aktualne osiągnięcia człowieka w tym temacie:

*„W chwili obecnej, z tego co mi wiadomo, chatboty nie są inteligentniejsze od nas. Ale myślę, że wkrótce mogą takie się stać [54]”.*

*„Obecnie obserwujemy algorytmy, takie jak algorytm GPT-4, który przyćmiewa człowieka pod względem posiadanej wiedzy ogólnej i robi to w sposób znaczący. Pod względem rozumowania nie jest jeszcze tak rozwinięty jak człowiek, ale już w tej chwili posiada podstawy tego rozumowania [54]”.*

Autor nie chce demonizować wyżej opisanego procesu, który prędzej czy później nadejść musi. Może się okazać, że implementacja sztucznej inteligencji do technik tworzenia modeli CAD, podobnie jak w przypadku ich integracji z zaawansowanym Projektowaniem Bazującym na Wiedzy, będzie miała pozytywny wpływ na rozwój zawodowy sfery inżynierskiej, jak i całego przemysłu. Należy jednak do powyższego tematu podchodzić z pewną dozą ostrożności.

Autorowi podczas sporządzania niniejszej pracy doktorskiej przyświecały idee wymienione na początku tego podsumowania i wniosków. Oznacza to, że jego celem – poprzez niniejszą rozprawę – było wniesienie własnego wkładu do poruszonej tematyki i przyczynienie się tym samym do postępu technologicznego człowieka. Oznacza to też, że niniejszą rozprawę zrealizował on z pobudek osobistych polegających na chęci poprawy własnych warunków życia i pracy. Czy jest w tym jednak coś złego? Autor głęboko wierzy, że dopóki sumienie i moralność kierują jego życiem nic nie jest w stanie sprawić, by idee te straciły swój jednoznacznie pozytywny wydźwięk na rzecz ich dwuznacznej interpretacji mogącej zachwiać jego wewnętrzną „strukturą”.



## Załącznik

### Przykład implementacji technik Modelowania Poziomego i Wieloobiektowego

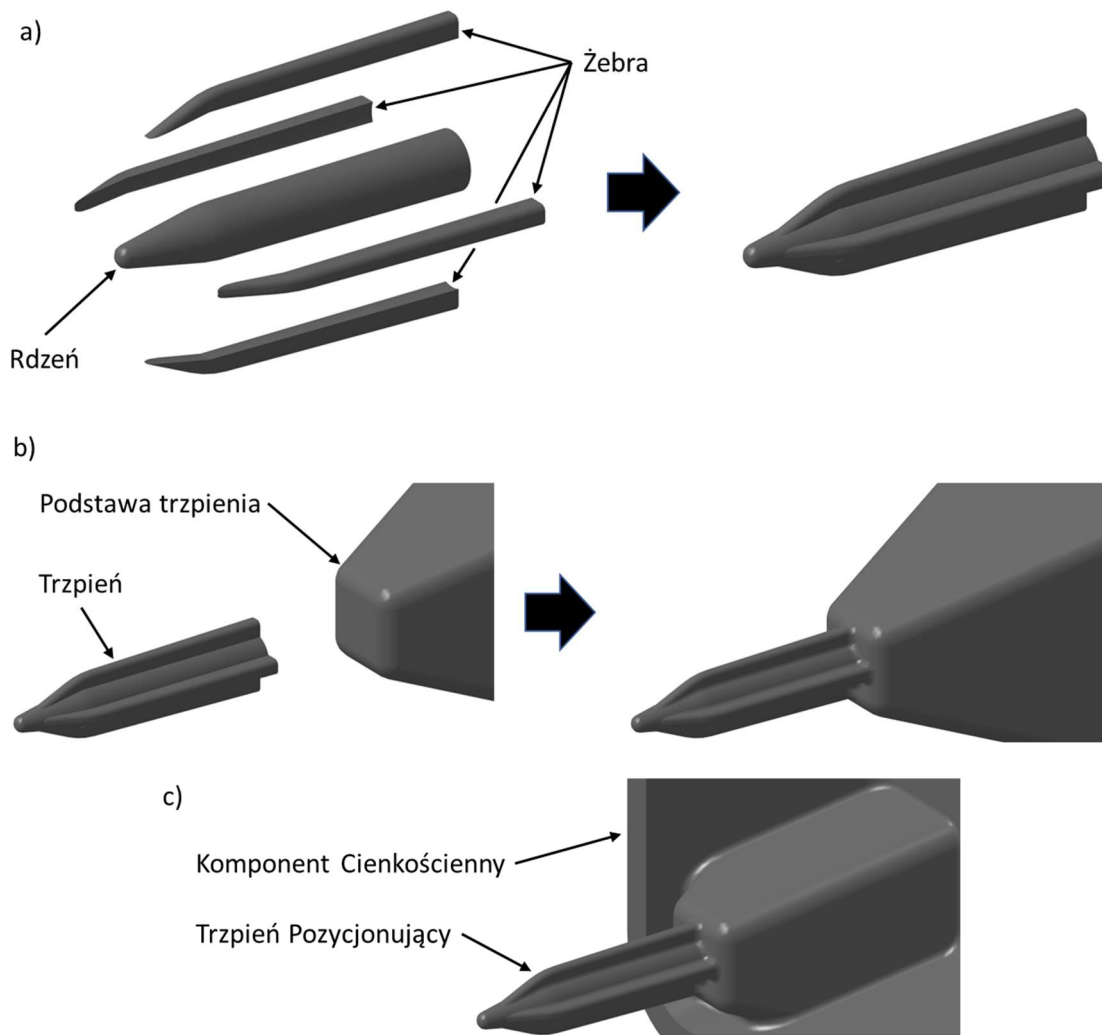
Załącznik do niniejszej pracy przedstawia dodatkowe przemyślenia i badania weryfikacyjne autora nad zastosowaniem technik, wchodzących w bezpośredni skład proponowanej techniki Modelowania Jednoznacznego, do tworzenia struktury przykładowego modelu 3D, których to zastosowanie pełni ważną rolę w metodyce optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD.

Nawet jeśli czytelnik niniejszej pracy nie zdecyduje się na implementację Modelowania Jednoznacznego do własnych projektów, to w opinii autora zawartość tego Załącznika pomoże mu w optymalizacji pracy związanej z tworzeniem modeli CAD wykorzystując obecnie znane, lecz w dalszym ciągu rzadko spotykane w komercyjnych zastosowaniach techniki – Modelowania Poziomego i Wieloobiektowego. Jednocześnie autor w poniższych rozważaniach zwraca uwagę, że integracja tych technik z proponowaną metodyką tworzenia modeli CAD w oparciu o Modelowanie Jednoznacznego pozwala rozwiązać problemy, które mogą wystąpić podczas procesu projektowo-konstrukcyjnego bez tej integracji. Niemniej jednak zaprezentowany w kolejnych punktach niniejszego Załącznika sposób wykorzystania Modelowania Poziomego i Modelowania Wieloobiektowego poparty wieloletnią praktyką zawodową autora może przyczynić się do zwiększenia efektywności tego procesu. Wynika to z tego, że zawarta w nich treść nie jest ogólnodostępna dla potencjalnego odbiorcy biorąc pod uwagę literaturę przedmiotu, jak również środowisko inżynierskie, pośród którego w dalszym ciągu prezentowane metodyki nie są często spotykane. W związku z powyższym autor postanowił nadać poniższej treści charakter własnych przemyśleń oraz badań, mających na celu wykazanie skuteczności rekomendowanych przez niego technik w procesie optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD.

#### 1. Elementy składowe topologii powierzchniowej modelu 3D utworzonego przy użyciu techniki Modelowania Poziomego

W niniejszym punkcie autor przedstawił elementy składowe topologii powierzchniowej modelu 3D, do utworzenia której użył techniki opisanej w punkcie 3.3.2 Rozdziału 3 niniejszej pracy – Modelowania Poziomego. Mimo, że modelem tym był *Komponent Cienkościenny*, autor zdecydował się skoncentrować uwagę czytelnika na jednym podmiocie tego komponentu – *Trzpieniu Pozycjonującym* i przeprowadzić badania, celem których było utworzenie wspomnianej topologii powierzchniowej, jak również jego topologii bryłowej, pokazując tym samym zalety wykorzystanych do ich utworzenia technik modelowania. Badania te zostały przedstawione w kolejnych punktach Załącznika. W rezultacie przygotowane topologie zostały zintegrowane wypełniając tym samym ideę tworzenia modeli CAD w oparciu o technikę Modelowania Hybrydowego, będącą techniką obligatoryjną w przypadku łączenia topologii powierzchniowej i bryłowej i jednocześnie rekomendowaną przez autora w przypadku tworzenia złożonych geometrycznych modeli CAD.

Rozpatrywany *Trzpień Pozycjonujący* jako jeden z podmiotów modelu 3D – *Komponentu Cienkościennego*, posiadał kilka części składowych tworzących jego integralną i nierozzerwalną całość (rys. Z1).

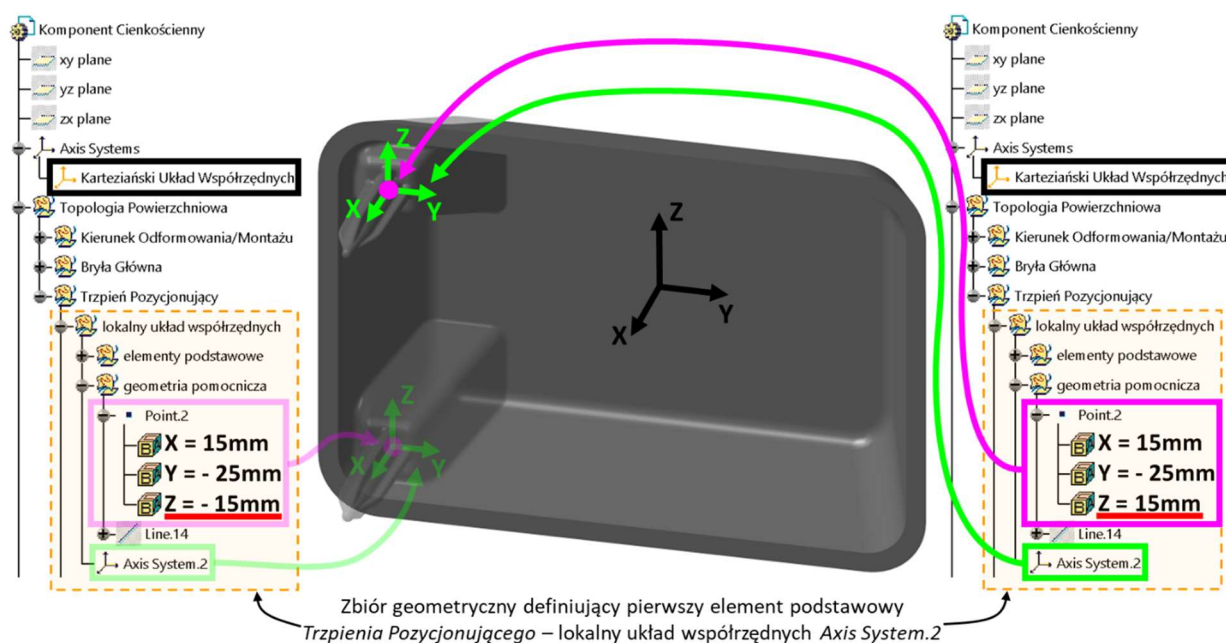


Rys. Z1. *Trzpień Pozycjonujący* z wyszczególnionymi częściami składowymi: a) *rdzeń* i *żebra*, b) *trzpień* i jego *podstawa*, c) *Trzpień Pozycjonujący* jako podmiot *Komponentu Cienkościennego*

Zwykle podział na części składowe danego podmiotu i dobór procedur konstrukcyjnych do ich utworzenia wynikają z inwencji konstruktora, a także z przyjętych kryteriów wyboru. W opisywanym przypadku przedstawiony podział był propozycją autora i wynikał z poruszanych w niniejszej pracy rozważań na temat technik tworzenia modeli 3D. Oznacza to, że gdyby kryteria wyboru było inne, podział ten, jak i dobór procedur konstrukcyjnych, mógłby wyglądać inaczej. Wspomniana integralność danego podmiotu powinna być przez konstruktora uwzględniona biorąc pod uwagę przyszłe modyfikacje tego podmiotu i jego implementację do innych modeli 3D. Z tego względu konstruktor przystępując do tworzenia jego topologii powierzchniowej powinien zdefiniować w pierwszej kolejności jego lokalizację, a w zasadzie elementy podstawowe w konkretnym miejscu w przestrzeni, od których będzie uzależniał kolejne części składowe podmiotu. Sama lokalizacja nie jest w gruncie rzeczy istotna, bo zostaje ona ostatecznie ustanowiona po zakończeniu prac nad modelem 3D. Dlatego jeśli celem utworzenia *Trzpienia Pozycjonującego* miało być również wykorzystanie go w innych niż rozpatrywany modelach 3D, to jego topologia musiała być zbudowana w taki sposób, by możliwe było wygenerowanie jej w dowolnym miejscu w przestrzeni. A skoro tak, zastosowanie opisywanych w niniejszej pracy technik do tworzenia modeli CAD powinno być zintegrowane z proponowaną przez autora techniką Modelowania Jednoznaczego. W przeciwnym wypadku konstruktor musi liczyć się z ryzykiem wystąpienia w ich topologii dwuznaczności geometrycznej.

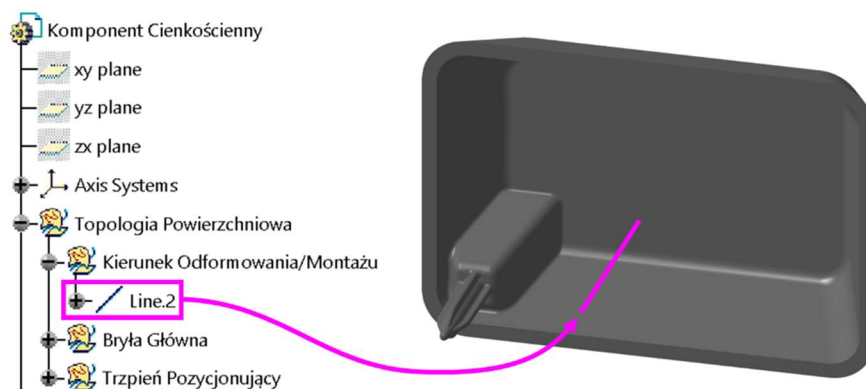


Przyjmując, że kryteriami wyboru dla tworzonego podmiotu jest jego niezależność od geometrii głównej modelu 3D, możliwość dowolnej zmiany lokalizacji i możliwość wykorzystania go w innych modelach 3D, to – według autora – optymalnym wyborem dla pierwszego elementu podstawowego definiującego konkretne miejsce w przestrzeni takiego podmiotu może być lokalny układ współrzędnych oparty na punkcie bazowym. Utworzenie lokalnego układu współrzędnych „otwiera” użytkownikowi możliwość definiowania elementów podstawowych dla kolejnych części składowych podmiotu takich jak punkty, linie czy płaszczyzny, a więc wykorzystania go na dalszych etapach tworzenia tego podmiotu, a także umożliwia szybką zmianę lokalizacji opartej na nim geometrii poprzez edycję koordynat punktu bazowego (rys. Z2). Ponadto, osie lokalnego układu współrzędnych umożliwiają użytkownikowi dokonywanie dodatkowych transformacji, takich jak obrót podmiotu wokół każdej z nich. Zapewnienie możliwości definiowania transformacji geometrycznych już na etapie utworzonych elementów podstawowych upraszcza topologię modelu 3D w dalszej jej części, bo eliminuje konieczność indywidualnego ingerowania w poszczególne operacje tej topologii.



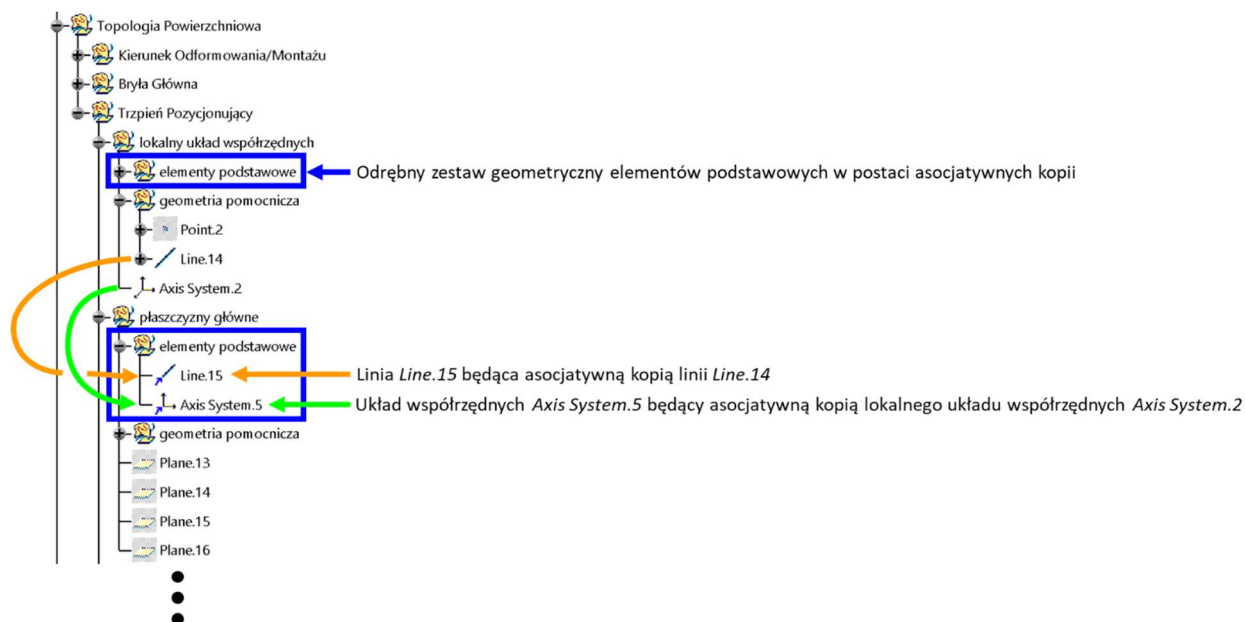
Rys. Z2. Zmiana koordynaty Z punktu bazowego *Point.2* wpływająca na zmianę lokalizacji lokalnego układu współrzędnych *Axis System.2*, a co za tym idzie geometrii na nim opartej – *Trzpienia Pozycjonującego*

Elementy definiujące lokalizację *Trzpienia Pozycjonującego* nie były jedynymi elementami podstawowymi w jego strukturze powierzchniowej. Elementy podstawowe występują wszędzie tam, gdzie zachodzi potrzeba ponownego wykorzystania wcześniej utworzonej geometrii. Wówczas staje się ona jednym z takich elementów i pełni tym samym rolę danych wejściowych geometrii do niej podrzędnej. Oznacza to, że mogą nimi być nie tylko podstawowe prymitywy geometryczne, takie jak punkt, linia czy płaszczyzna, ale także każda inna utworzona geometria wymagająca ponownego zastosowania na dalszych etapach konstruowania. W przypadku opisywanego trzpienia taką rolę pełniła również linia, dzięki której autor konstruowanemu komponentowi wytwarzanemu technologią wtrysku zapewniał jego technologiczność oraz możliwość prawidłowego montażu. Dlatego też wszystkie jego pochylenia technologiczne oraz jego kierunek powiązane zostały z tą jedną geometrią (rys. Z3).



Rys. Z3. *Komponent Cienkościenny* zbudowany w oparciu o jeden kierunek odformowania/montażu *Line.2*

Autor zdecydował się wprowadzić dla poszczególnych części składowych trzpienia, jak i dla całego *Komponentu Cienkościennego*, odrębne zestawy geometryczne pełniące role zbiorów elementów podstawowych w postaci asocjatywnych kopii tych elementów. Określenie „asocjatywna kopia” oznacza, że istnieje powiązanie między elementem kopiowanym, a jego kopią. Zatem zmiana jednej geometrii jest odzwierciedlona w jej kopii. Dzięki temu zabiegowi użytkownik odnajdując dany fragment topologii jest w stanie łatwo sprawdzić jakie dane wejściowe są w tym fragmencie wykorzystane (rys. Z4). Taki rodzaj grupowania geometrii zastosowano również w pierwszym zestawie geometrycznym definiującym lokalny układ współrzędnych *Trzpienia Pozycjonującego* – *Axis System.2*. Zatem zbiór definiujący pierwszy element podstawowy trzpienia również posiadał swój własny zestaw geometryczny *elementy podstawowe* (rys. Z2).

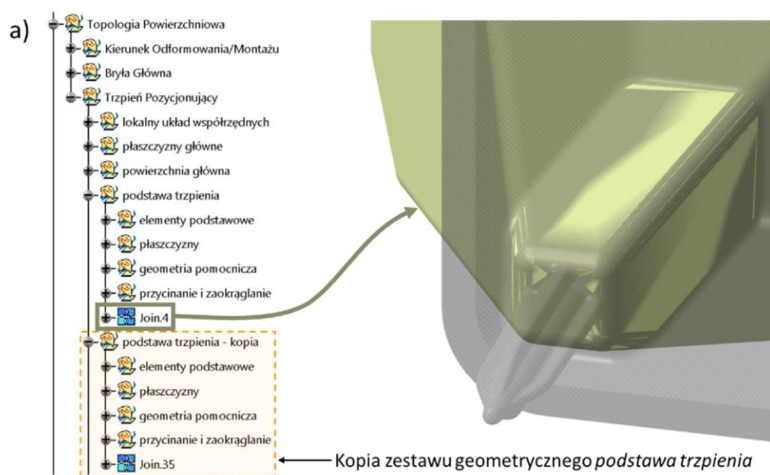


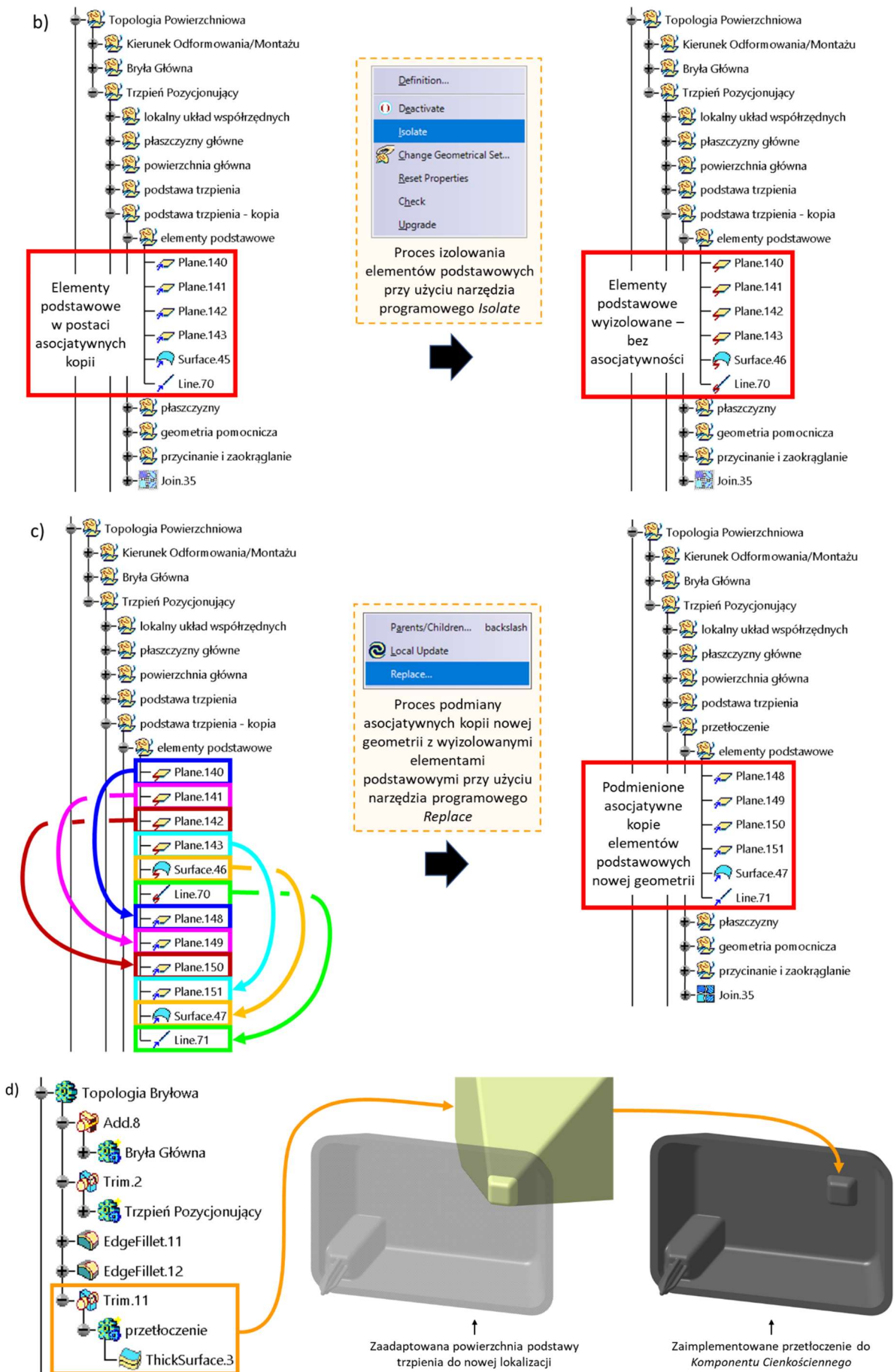
Rys. Z4. Odrębne zestawy geometryczne danych wejściowych w postaci elementów podstawowych poszczególnych fragmentów topologii powierzchniowej *Trzpienia Pozycjonującego* z przykładowymi elementami w postaci asocjatywnych kopii (*Line.15*, *Axis System.5*)

Jedynym elementem podstawowym nie ujętym bezpośrednio w topologii *Komponentu Cienkościennego*, a co za tym idzie – samego trzpienia, był bazowy *Kartezjański układ*

współrzędnych, gdyż tak jak wspomniano w punkcie 3.3.2 Rozdziału 3 niniejszej pracy, jest to element obecny w każdym pliku CAD. Zatem, zdaniem autora, nie ma potrzeby tworzenia asocjatywnych kopii w celu jego wykorzystania w danej topologii modelu 3D. Zaproponowana forma reprezentacji danych wejściowych jako elementów podstawowych w topologii powierzchniowej opisywanego modelu 3D uwydatniła kolejną, po wykorzystaniu tych elementów, fundamentalną składową Modelowania Poziomego. Jest nią, wspomniana już wcześniej, sieć powiązań między operacjami tworząca spójną i logiczną całość. W rozpatrywanym przypadku oznacza to, że poszczególne fragmenty topologii trzpienia, jak i fragmenty całego *Komponentu Cienkościennego*, zachowywały asocjatywność między sobą, ale każdy z nich mógł stanowić niezależną jednostkę geometryczną, którego wewnętrzne relacje między operacjami nie stanowiły przeszkody przy próbie jego skopiowania i ponownego utworzenia w tym samym lub innym modelu 3D. Aby ową niezależność dla danej jednostki geometrycznej uzyskać należało wyizolować użyte w niej elementy podstawowe za pomocą odpowiedniego narzędzia programowego systemu CAD usuwając tym samym wszelkie zewnętrzne powiązania. Co więcej, utraconą asocjatywność można było przywrócić w nowej lokalizacji poprzez odwołanie się do zestawu geometrycznego z wyizolowanymi elementami podstawowymi i podmienić je z elementami powiązаныmi już z nową zewnętrzną geometrią przy użyciu adekwatnego narzędzia programowego systemu CAD. Jeśli w opisywanej topologii *Komponentu Cienkościennego* użytkownik chciałby powtórnie wykorzystać na przykład powierzchnię podstawy trzpienia w formie dodatkowego przetłoczenia tego komponentu, to wykonuje on następującą procedurę konstrukcyjną:

- 1) kopiowanie całego zestawu geometrycznego podstawy trzpienia (rys. Z5a); należy w tym miejscu zwrócić uwagę, że kopia danego zestawu geometrycznego oznacza pełną niezależność między zestawem kopiowanym, a jego kopią; natomiast wewnętrzne relacje między operacjami, a także relacje elementów podstawowych skopiowanego zestawu zostają zachowane,
- 2) usuwanie asocjatywności elementów podstawowych skopiowanego zestawu przy użyciu narzędzia programowego systemu CAD do izolowania geometrii (rys. Z5b),
- 3) utworzenie asocjatywnych kopii nowej geometrii w zbiorze elementów podstawowych i ich podmiana [50] z wcześniej wyizolowaną geometrią przy użyciu narzędzia programowego systemu CAD do podmiany geometrii (rys. Z5c),
- 4) utworzenie cienkościennej bryły na podstawie zaadaptowanej do nowej lokalizacji powierzchni podstawy trzpienia i zaimplementowanie jej w formie przetłoczenia do *Komponentu Cienkościennego* przy użyciu operacji Boole'a (*Trim.11*) (rys. Z5d).





Rys. Z5. Procedura konstrukcyjna wykorzystania istniejącej geometrii modelu 3D w formie jej kopii do utworzenia nowego rejonu *Komponentu Cienkościennego* – przetłoczenia: a) kopiowanie

całego zestawu geometrycznego podstawy trzpienia, b) usuwanie asocjatywności elementów podstawowych skopiowanego zestawu przy użyciu programowego narzędzia do izolowania geometrii, c) utworzenie asocjatywnych kopii nowej geometrii w zbiorze elementów podstawowych i ich podmiana z wcześniej wyizolowaną geometrią, d) utworzenie cienkościennej bryły na podstawie zaadaptowanej do nowej lokalizacji powierzchni podstawy trzpienia i zaimplementowanie jej w formie przetłoczenia do *Komponentu Cienkościennego* przy użyciu operacji Boole'a

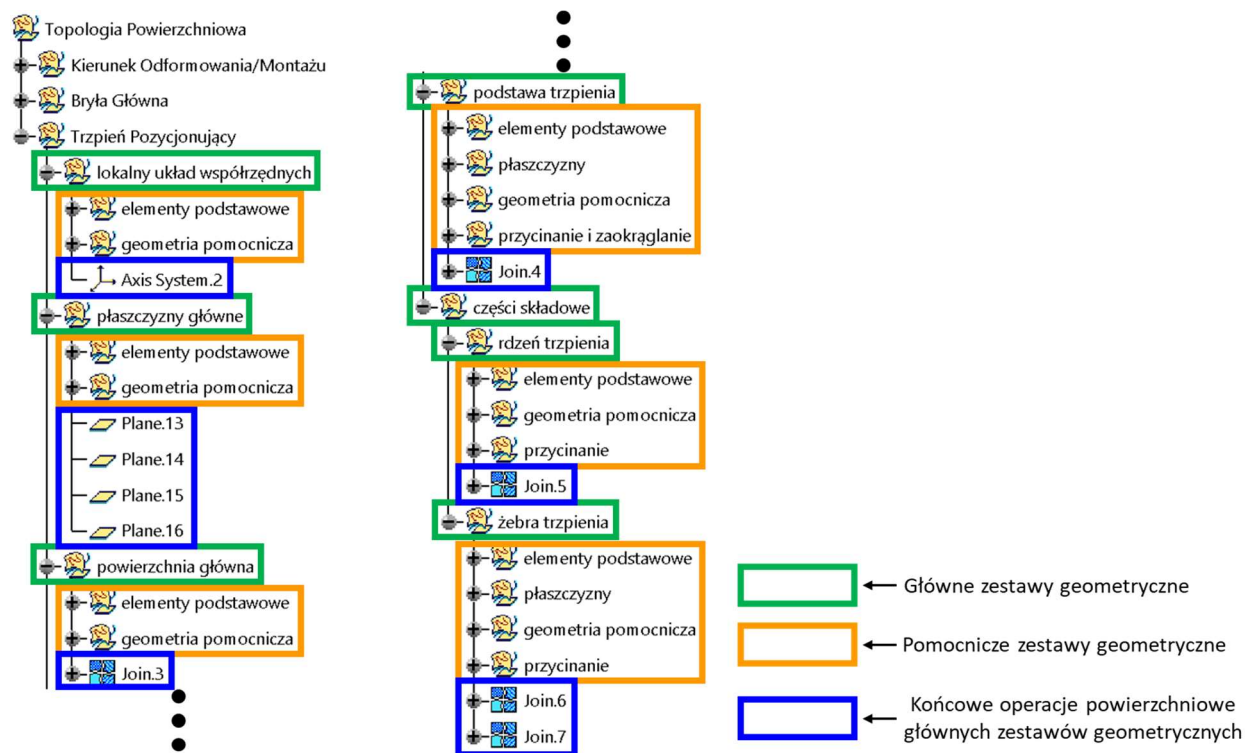
Pomimo niewątpliwej użyteczności powyższej procedury konstrukcyjnej, tego typu działania wiążą się z potencjalnym wystąpieniem wielokrotnie przytaczanej w tej pracy dwuznaczności wynikającej z wykorzystywanej we współczesnych systemach CAD geometrii zorientowanej. Jednak problem ten można rozwiązać poprzez implementację do niej, jak i do każdej innej procedury konstrukcyjnej, w której zachodzi ryzyko jego wystąpienia – Modelowania Jednoznacznego. Temat ten został poruszony i zbadany w Rozdziale 4 niniejszej pracy.

Podsumowując powyższe rozważania autor chciałby podkreślić, że sieć powiązań między operacjami modelu 3D nie sprowadza się do tworzenia zależności „każdy z każdym”, lecz powinna stanowić przemyślaną i podatną na potencjalne zmiany strukturę. Tworzenie odrębnych asocjatywnych kopii za każdym razem, gdy wymagane jest powtórne zastosowanie wcześniej utworzonej geometrii może być obligatoryjne dla wykorzystywanej konfiguracji danego systemu CAD. Należy jednak zaznaczyć, że nie jest to regułą i w niektórych przypadkach na użytkownika nie jest nakładany taki obowiązek. Wtedy też danymi wejściowymi w postaci elementów podstawowych mogą być po prostu operacje bezpośrednio użyte w strukturze modelu więcej niż jeden raz – bez tworzenia dodatkowych asocjatywnych kopii. Pytanie jakie można by w tym miejscu zadać to: *Czy takie bezpośrednio wielokrotne użycie tej samej geometrii wpisuje się w ideę zachowania harmonii i spójności postaciowej drzewa struktury modelu 3D?* Autor pozostawia tę kwestię otwartą, jednocześnie bardziej zwracając się ku rozwiązaniu z wykorzystaniem asocjatywnych kopii nawet jeśli wspomniany obowiązek użytkownika nie dotyczy.

Badania nad zastosowaniem Modelowania Poziomego do generowania powierzchniowej topologii *Trzpienia Pozyjonującego* autor rozpoczął od zdefiniowania głównych zestawów geometrycznych, aby w następnym etapie dodawać w nich kolejne operacje modelowania. W rezultacie zestawy te zawierały następującą geometrię:

- *Lokalny układ współrzędnych* – pierwszy element podstawowy definiujący lokalizację trzpienia, a co za tym idzie lokalizację geometrii powierzchniowej i bryłowej trzpienia,
- *Płaszczyzny główne* – elementy podstawowe definiujące położenie bocznych powierzchni części składowych trzpienia względem lokalnego układu współrzędnych,
- *Powierzchnia główna* – powierzchnia definiująca początek trzpienia jak i jego podstawę; element podstawowy definiujący położenie bocznych powierzchni części składowych trzpienia względem lokalnego układu współrzędnych,
- *Podstawa trzpienia* – geometria bezpośrednio wykorzystana w topologii bryłowej,
- *Rdzeń trzpienia* – geometria bezpośrednio wykorzystana w topologii bryłowej; zestaw geometryczny *rdzeń trzpienia* znajdujący się w dodatkowym zestawie głównym *części składowe*,
- *Żebra trzpienia* – geometria bezpośrednio wykorzystana w topologii bryłowej; zestaw geometryczny *żebra trzpienia* znajdujący się w dodatkowym zestawie głównym *części składowe*.

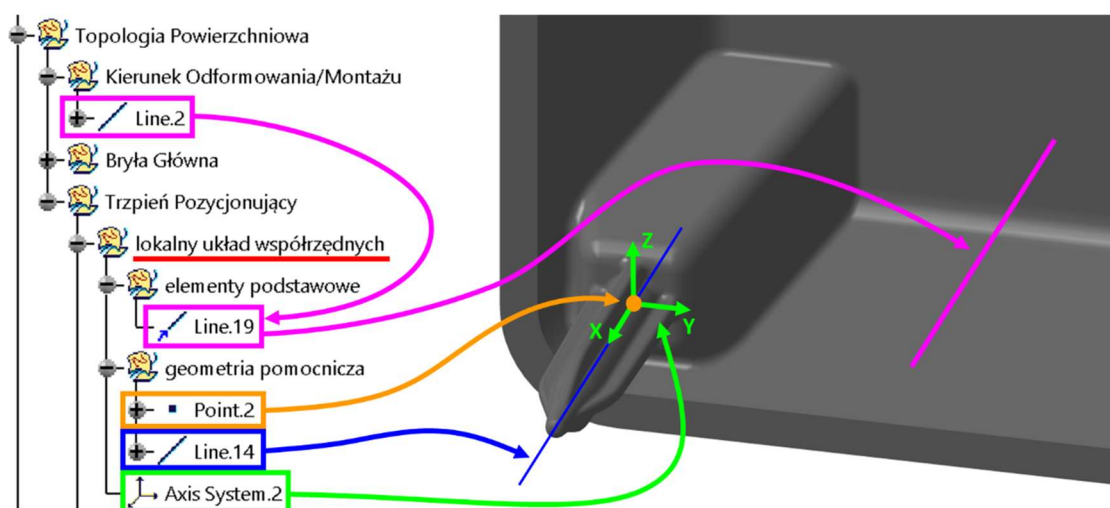
Główne zestawy geometryczne drzewa struktury badanego modelu 3D zostały utworzone w taki sposób, aby stanowiły odrębne lokalne topologie powierzchniowe zawierające wewnętrzne powiązania tworzące pewną zamkniętą całość. W każdym głównym zestawie geometrycznym zawarto kilka zestawów pomocniczych dzieląc utworzoną w nich geometrię tak, aby była ona zrozumiała dla użytkownika bez ich otwierania. Operacja lub zbiór operacji powierzchniowych znajdujące się na końcu każdego zestawu głównego pełniły rolę elementów podstawowych na dalszych etapach tworzenia topologii powierzchniowej lub były bezpośrednio wykorzystane w topologii bryłowej modelu 3D (rys. Z6).



Rys. Z6. Topologia powierzchniowa *Trzpienia Pozycjonującego* podzielona na główne i pomocnicze zestawy geometryczne oraz na operacje powierzchniowe kończące każdy z głównych zestawów

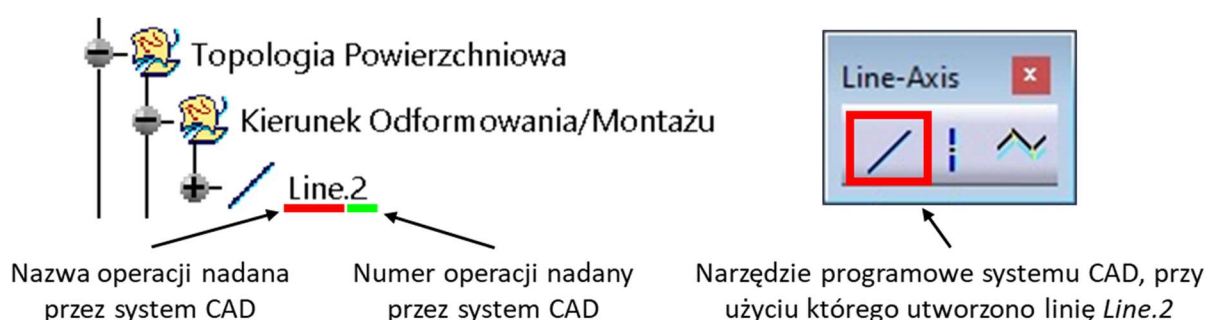
Zestawy główne nazwano zgodnie z planowanymi funkcjami ich operacji końcowych. Można zatem stwierdzić, że zbiór wszystkich operacji powierzchniowej topologii *Trzpienia Pozycjonującego* przybrał postać jednej fundamentalnej procedury konstrukcyjnej w konsekwencji służącej do wygenerowania jego bryłowej odpowiedniczki, a co za tym idzie służącej do wygenerowania końcowej formy modelu 3D.

W związku z powyższym w zestawie *lokalny układ współrzędnych* znalazł się ów układ (*Axis System.2*) oraz geometria go tworząca – elementem podstawowym była asocjatywna kopia kierunku odformowania/montażu *Line.2* (*Line.19*), a geometrią pomocniczą był punkt definiujący lokalizację układu w przestrzeni (*Point.2*) oraz linia definiująca jego oś X o długości 35 mm, której kierunek był zgodny z asocjatywną kopią kierunku odformowania/montażu *Line.19* (*Line.14*) (rys. Z7).



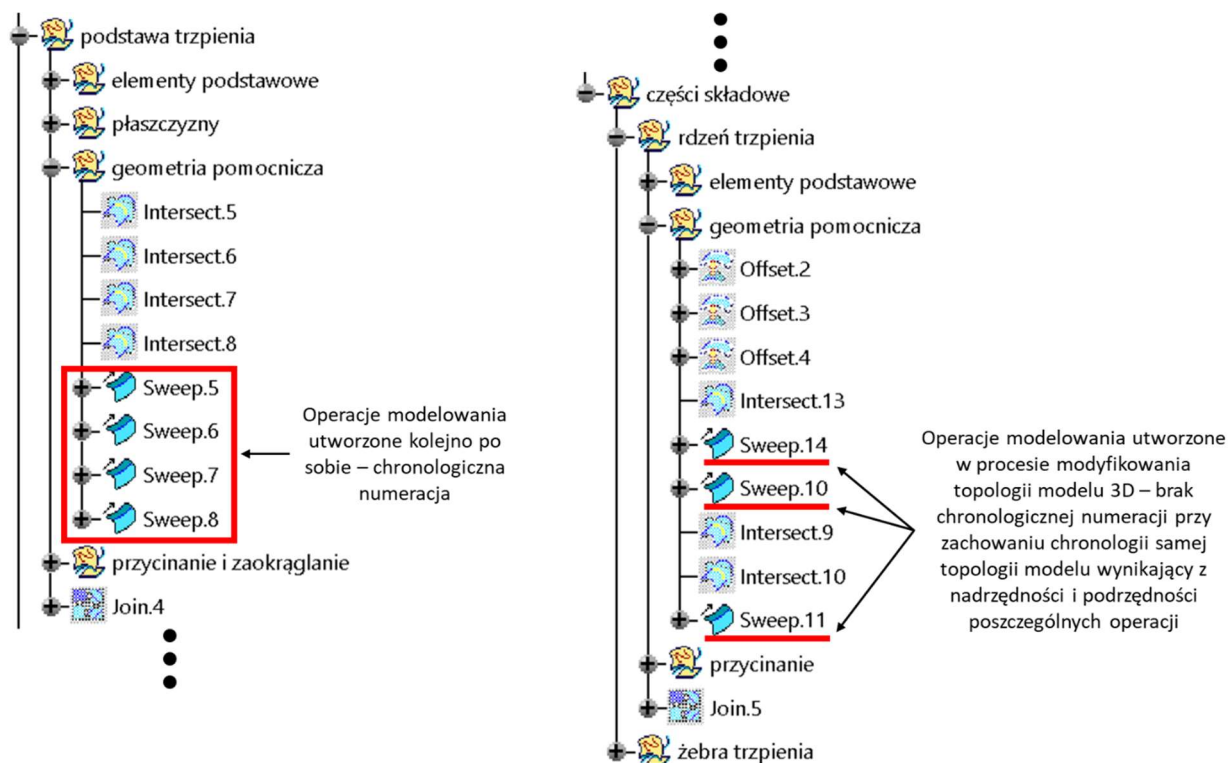
Rys. Z7. Topologia lokalnego układu współrzędnych *Axis System.2* Trzpienia Pozycjonującego

Pozostałe dwie osie nie zostały zdefiniowane przez autora, dlatego też system CAD automatycznie powiązał je z bazowym *Kartezjańskim układem współrzędnych*. Czy pozostawianie domyślnych powiązań niektórych atrybutów narzędzi programowych danych operacji jest w technice Modelowania Poziomego dopuszczalne? Tak, natomiast może to być źródłem kolejnej dwuznaczności, a więc potencjalnych problemów na przykład podczas modyfikacji modeli 3D. W analogiczny sposób przygotowano dalszą część topologii powierzchniowej trzpienia, która została przedstawiona w punkcie 2 niniejszego Załącznika. Autor zdecydował się przedstawić ją w „obrazkowej” i bardziej zwartej opisowo formie, gdyż jego zdaniem była ona w tym przypadku bardziej czytelna nie tylko dla osób ze środowiska inżynierskiego, ale również dla każdego innego czytelnika. Autor chciałby przy tym zaznaczyć, że większość pojawiających się poniżej, jak i w całej niniejszej pracy, operacji modelowania posiadała nazwy nadawane automatycznie przez system CAD – CATIA V5. Nazwy te odzwierciedlały generowaną w ten sposób geometrię, jak i reprezentowały nazwę narzędzi programowych, za pomocą których owe operacje zostały utworzone. Dodatkowo, każda z tych operacji posiadała swój numer nadawany również automatycznie przez system CAD podczas ich tworzenia (rys. Z8).



Rys. Z8. Przykład operacji modelowania, której nazwa została wygenerowana automatycznie przez system CAD

Numeracja poszczególnych operacji modelowania może odzwierciedlać hierarchiczny układ danego drzewa struktury modelu 3D. W praktyce jednak często zdarza się, że nie pokrywa się ona z tym układem, bo w trakcie generowania modelu niejednokrotnie zachodzi potrzeba dodania nowych operacji w utworzonych już rejonach struktury. W takich sytuacjach chronologia numeracji w danym drzewie struktury modelu 3D zostaje zaburzona (rys. Z9).



Rys. Z9. Przykład operacji modelowania utworzonych z zachowaniem ich chronologicznej numeracji oraz operacji utworzonych w procesie modyfikowania topologii modelu 3D powodującym jej zerwanie na rzecz zachowania chronologii samej topologii modelu 3D

Nie jest to jednak błąd konstruowania, bo owa chronologia odnosi się w ogólny sposób do wszystkich utworzonych operacji w danym pliku CAD, a nie do konkretnego fragmentu struktury modelu 3D. Co więcej, według autora, jeśli w czasie konstruowania zachodzi potrzeba dodania nowej operacji modelowania do istniejącej już topologii, to wręcz należy ulokować ją w niej w taki sposób, aby chronologiczny układ tej topologii wynikający z nadrzędności i podrzędności kolejnych operacji był zachowany. Tak więc utrzymywanie automatycznej numeracji nowo tworzonych operacji modelowania tak, by najwyższy jej numer był zawsze na końcu topologii należy już rozpatrywać w kontekście błędu.

## 2. Tworzenie topologii powierzchniowej modelu 3D przy użyciu techniki Modelowania Poziomego

Poniższy opis tworzenia topologii powierzchniowej *Trzpienia Pozyjonującego* został przygotowany w taki sposób, aby odpowiadał jej głównym zestawom geometrycznym, w których autor generował kolejne operacje modelowania:

### **Lokalny układ współrzędnych (Axis System.2) (rys. Z7)**

*Elementy podstawowe:*

- 1) Asocjatywna kopia kierunku odformowania/montażu *Line.2 (Line.19)*.

*Geometria pomocnicza:*

- 1) Punkt definiujący pozycję lokalnego układu współrzędnych *Axis System.2* w przestrzeni (*Point.2*).
- 2) Linia definiująca oś X lokalnego układu współrzędnych *Axis System.2* o długości 35 mm, której kierunek jest zgodny z linią *Line.19 (Line.14)*.



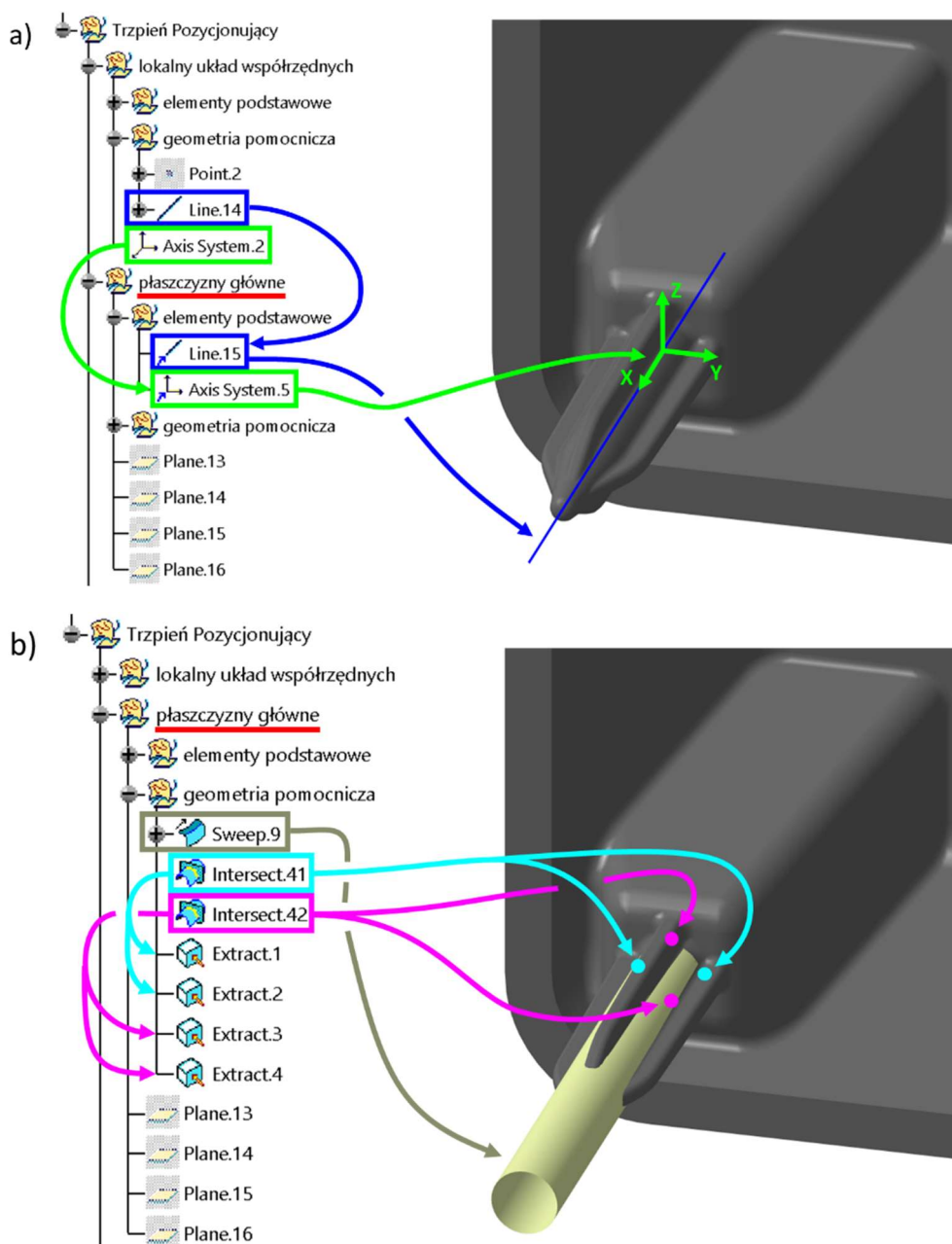
### ***Plaszczyzny główne (Plane.13, Plane.14, Plane.15, Plane.16)***

*Elementy podstawowe* (rys. Z10a):

- 1) Asocjatywna kopia linii definiującej oś X lokalnego układu współrzędnych *Line.14* (***Line.15***).
- 2) Asocjatywna kopia lokalnego układu współrzędnych *Axis System.2* (***Axis System.5***).

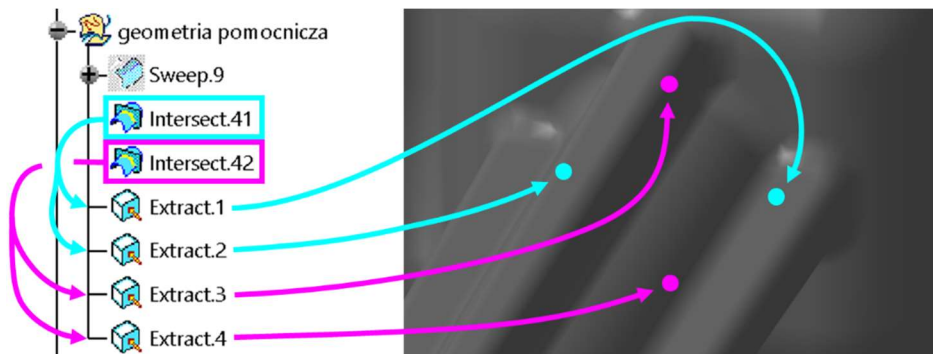
*Geometria pomocnicza* (rys. Z10b):

- 1) Cylindryczna powierzchnia o promieniu 1,5 mm zbudowana w oparciu o asocjatywną kopię linii definiującej oś X lokalnego układu współrzędnych *Line.15* (***Sweep.9***).
- 2) Punkty przecięcia cylindrycznej powierzchni *Sweep.9* z osią Y asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.5* (***Intersect.41***).
- 3) Punkty przecięcia cylindrycznej powierzchni *Sweep.9* z osią Z asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.5* (***Intersect.42***).



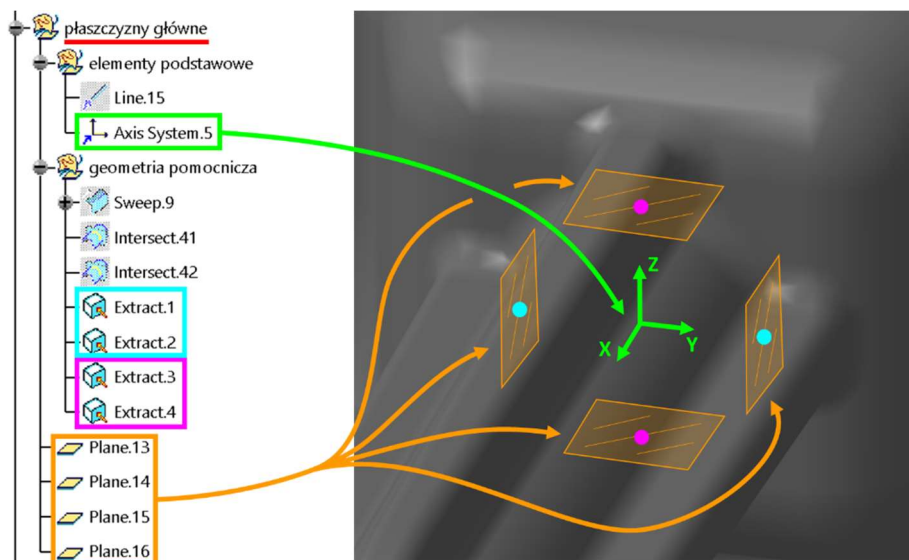
Rys. Z10. Topologia płaszczyzn głównych *Plane.13, Plane.14, Plane.15, Plane.16* Trzpienia Pozycjonującego: a) *elementy podstawowe*, b) *geometria pomocnicza*

- 4) Wyodrębnione punkty przecięć *Intersect.41* oraz *Intersect.42* (***Extract.1***, ***Extract.2***, ***Extract.3***, ***Extract.4***). Przecięcie powierzchni cylindrycznej z osią układu współrzędnych generowało dwa punkty w formie jednej operacji (*Intersect*). W związku z tym należało wyodrębnić te punkty w taki sposób, aby każdy z nich był reprezentowany przez jedną operację. Zadanie to umożliwiło narzędzie programowe służące do wyodrębniania geometrii takiej jak powierzchnie, krzywe czy punkty – w systemie CATIA V5 narzędzie programowe *Extract* (rys. Z11). Warto wspomnieć, że utworzenie powyższych wyodrębnień geometrycznych wiązało się z ryzykiem wystąpienia tak zwanej imiennej dwuznaczności podczas transformacji geometrycznych opisywanego podmiotu.



Rys. Z11. Wyodrębnione punkty przecięć *Intersect.41* i *Intersect.42* (*Extract.1*, *Extract.2*, *Extract.3*, *Extract.4*) utworzone przy użyciu narzędzia programowego *Extract*

Utworzone według powyższej procedury *plaszczyny główne* były równoległe do płaszczyzny XZ (***Plane.13***, ***Plane.14***) i do płaszczyzny XY (***Plane.15***, ***Plane.16***) asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.5* i przechodziły przez wyodrębnione punkty *Extract.1*, *Extract.2*, *Extract.3*, *Extract.4* (rys. Z12).

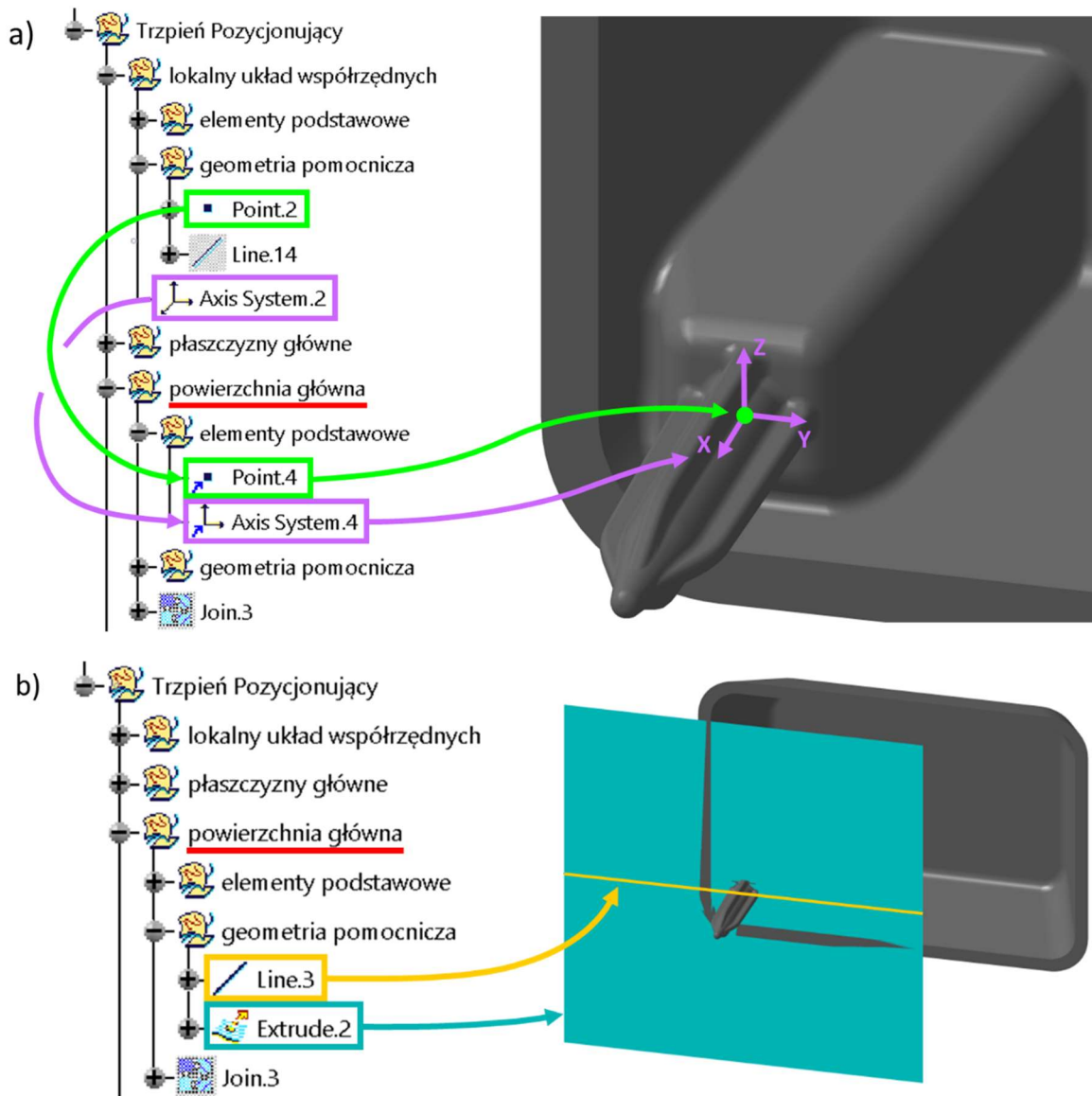


Rys. Z12. Płaszczyzny główne *Plane.13*, *Plane.14*, *Plane.15*, *Plane.16* Trzpienia Pozycjonującego

### **Powierzchnia główna (*Join.3*)**

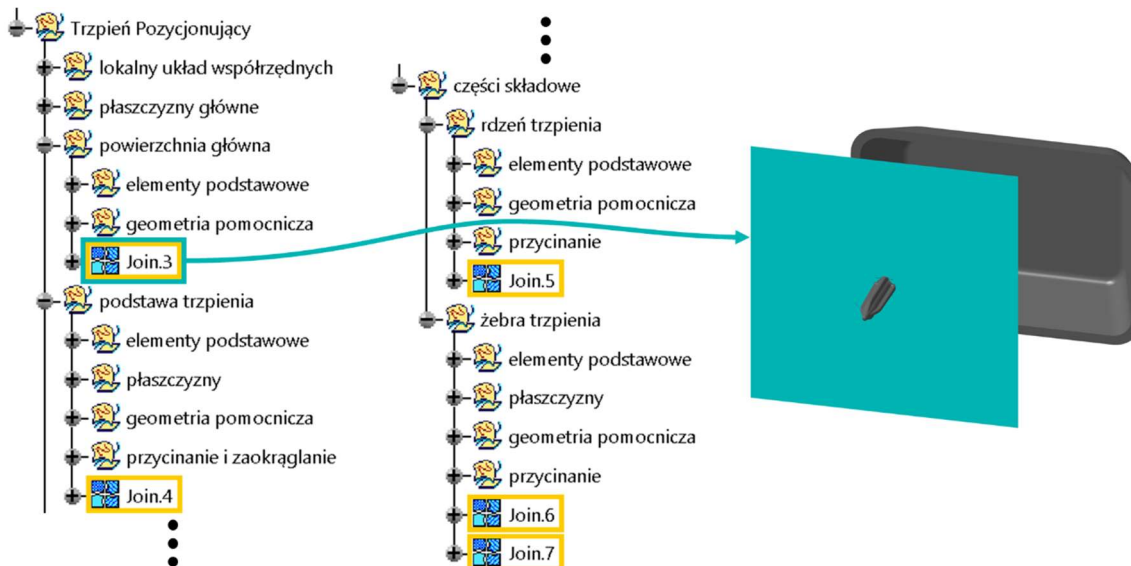
*Elementy podstawowe* (rys. Z13a):

- 1) Asocjatywna kopia punktu definiującego pozycję lokalnego układu współrzędnych *Point.2* (***Point.4***).
  - 2) Asocjatywna kopia lokalnego układu współrzędnych *Axis System.2* (***Axis System.4***).
- Geometria pomocnicza* (rys. Z13b):
- 1) Linia pozioma wzdłuż osi Y asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.4* o długości 60 mm (***Line.3***).
  - 2) Powierzchnia utworzona przez wyciągnięcie linii *Line.3* wzdłuż osi Z asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.4* na długość 60 mm (***Extrude.2***).



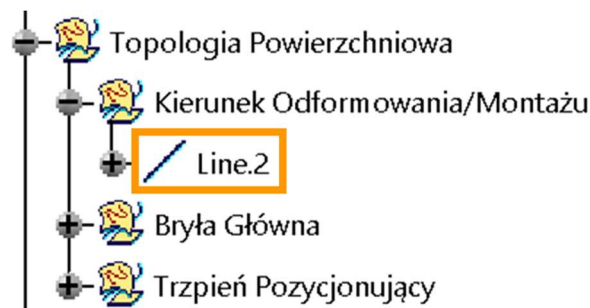
Rys. Z13. Topologia powierzchni głównej *Join.3* Trzpienia Pozycjonującego: a) *elementy podstawowe*, b) *geometria pomocnicza*

Powierzchnia główna (***Join.3***) została utworzona przy użyciu narzędzia programowego *Join*. Główną funkcjonalnością tego narzędzia jest łączenie geometrii w jednej operacji. W tym przypadku wykorzystana została tylko jedna geometria w postaci powierzchni *Extrude.2*. Zatem jej powtórzenie w formie operacji *Join* miało inne zadanie niż łączenie kilku geometrii, mianowicie wprowadziło pewną unifikację do drzewa struktury modelu 3D. Tym sposobem autor poza „wyciągnięciem” końcowej operacji z pomocniczego zestawu do głównego zestawu geometrycznego mógł wyróżnić ją i wprowadzić większą spójność topologiczną (rys. Z14).



Rys. Z14. Powierzchnia główna *Join.3* Trzpienia Pozycjonującego utworzona przy użyciu narzędzia programowego *Join* poprawiającego spójność topologiczną modelu 3D

Takie działanie nie jest w technice Modelowania Poziomego obligatoryjne. Autor sugeruje, by stosować je w uzasadnionych przypadkach, bo jej nadużywanie może spowodować efekt odwrotny. W opisywanym przykładzie nie wszystkie operacje miały postać utworzoną narzędziem *Join*, by natywne dla danego narzędzia programowego ikony sugerowały użytkownikowi ich przeznaczenie. Na przykład rozsądniejszym wydawało się zostawienie operacji kierunku odformowania/montażu *Line.2* w niezmienionej przez *Join* formie w celu umożliwienia użytkownikowi odróżnienie „na pierwszy rzut oka” linii od na przykład powierzchni (rys. Z15). Trzecią, równie istotną, funkcjonalnością narzędzia programowego *Join* jest możliwość dokonania zmiany orientacji połączonej lub pojedynczej geometrii – bez wykorzystania do tego celu dodatkowych narzędzi programowych.



Rys. Z15. Operacja kierunku odformowania/montażu w postaci natywnej ikony narzędzia programowego, za pomocą którego została utworzona

### **Podstawa trzpienia (*Join.4*)**

*Elementy podstawowe* (rys. Z16a):

- 1) Asocjatywna kopia płaszczyzny głównej *Plane.13* (***Plane.17***).
- 2) Asocjatywna kopia płaszczyzny głównej *Plane.14* (***Plane.18***).
- 3) Asocjatywna kopia płaszczyzny głównej *Plane.15* (***Plane.19***).
- 4) Asocjatywna kopia płaszczyzny głównej *Plane.16* (***Plane.20***).
- 5) Asocjatywna kopia powierzchni głównej *Join.3* (***Surface.3***).
- 6) Asocjatywna kopia kierunku odformowania/montażu *Line.2* (***Line.22***).

*Płaszczyzny* (rys. Z16b):

Podstawa trzpienia wymagała zastosowania dodatkowych płaszczyzn zbudowanych w oparciu o asocjatywne kopie płaszczyzn głównych. W związku z tym w celu zwiększenia czytelności topologicznej autor wprowadził do tej topologii osobny zbiór pomocniczy składający się tylko z płaszczyzn.

- 1) Płaszczyzna odsunięta od asocjatywnej kopii płaszczyzny głównej *Plane.17* o 1,5 mm (***Plane.21***).
- 2) Płaszczyzna odsunięta od asocjatywnej kopii płaszczyzny głównej *Plane.18* o 1,5 mm (***Plane.22***).
- 3) Płaszczyzna odsunięta od asocjatywnej kopii płaszczyzny głównej *Plane.19* o 1,5 mm (***Plane.23***).
- 4) Płaszczyzna odsunięta od asocjatywnej kopii płaszczyzny głównej *Plane.20* o 1,5 mm (***Plane.24***).

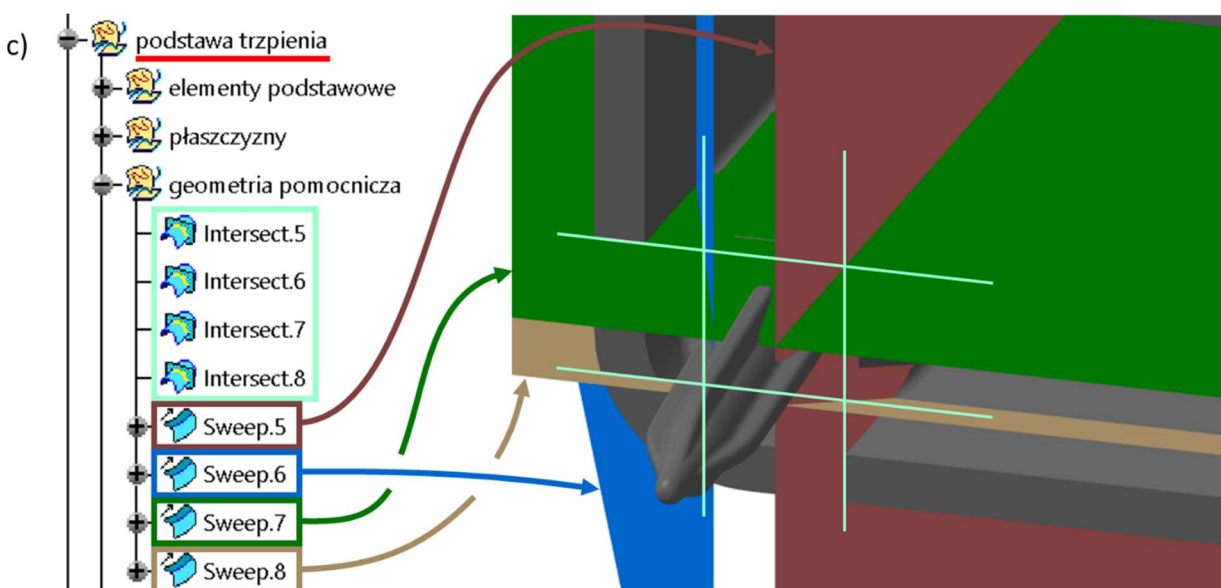
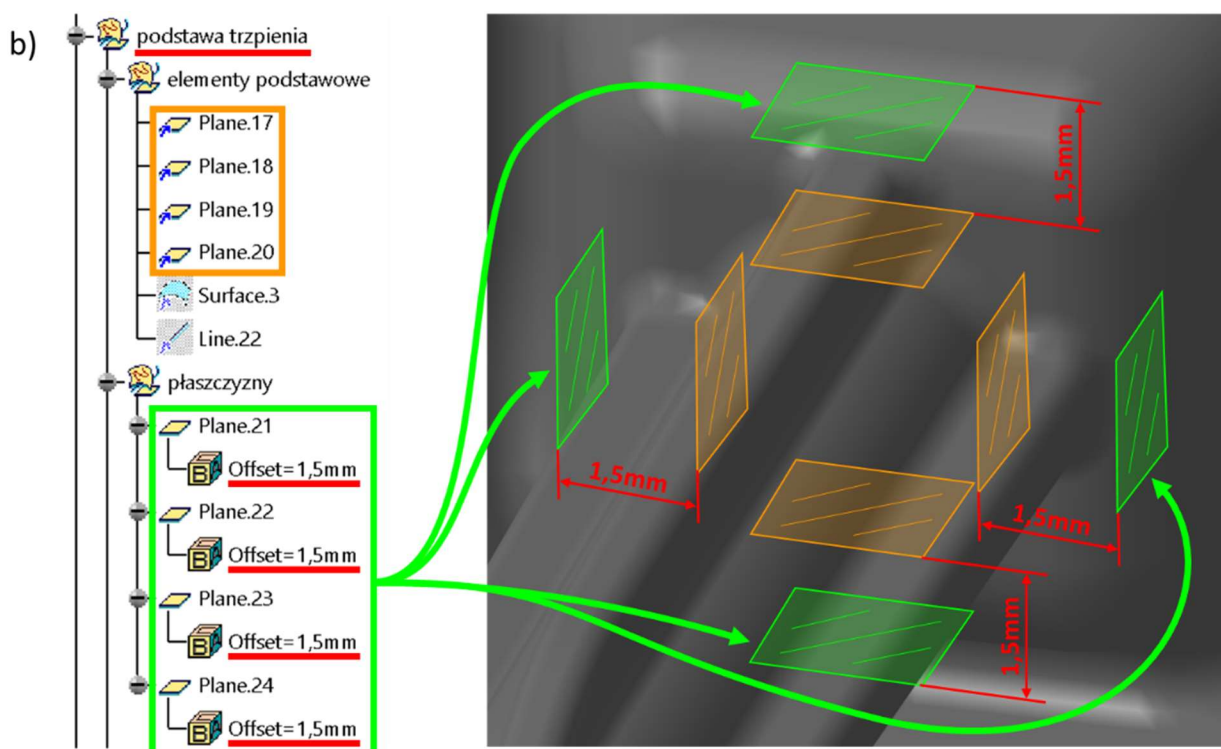
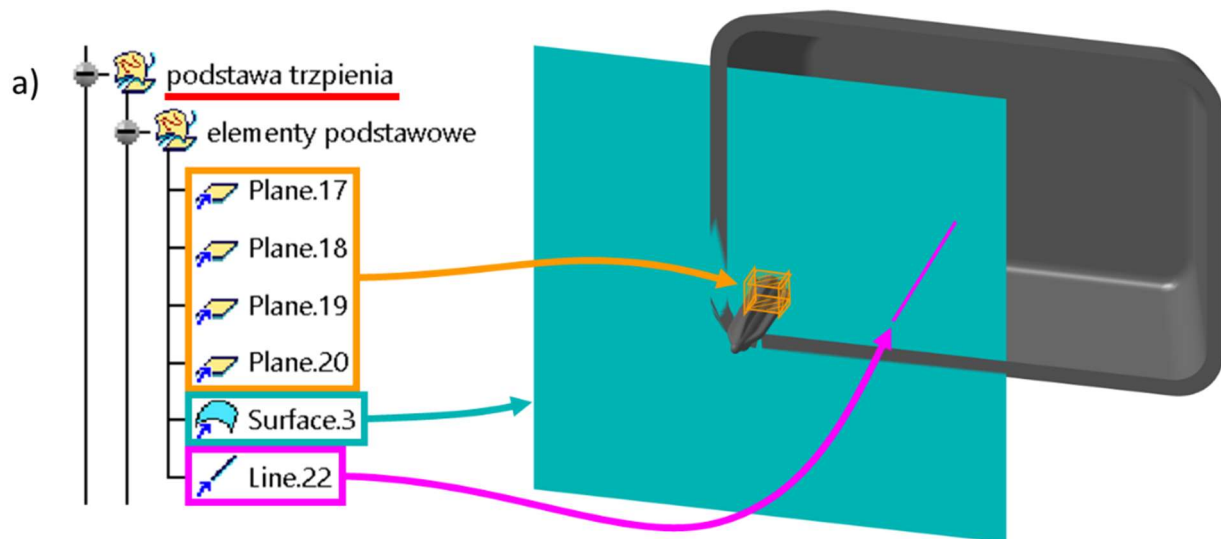
*Geometria pomocnicza* (rys. Z16c):

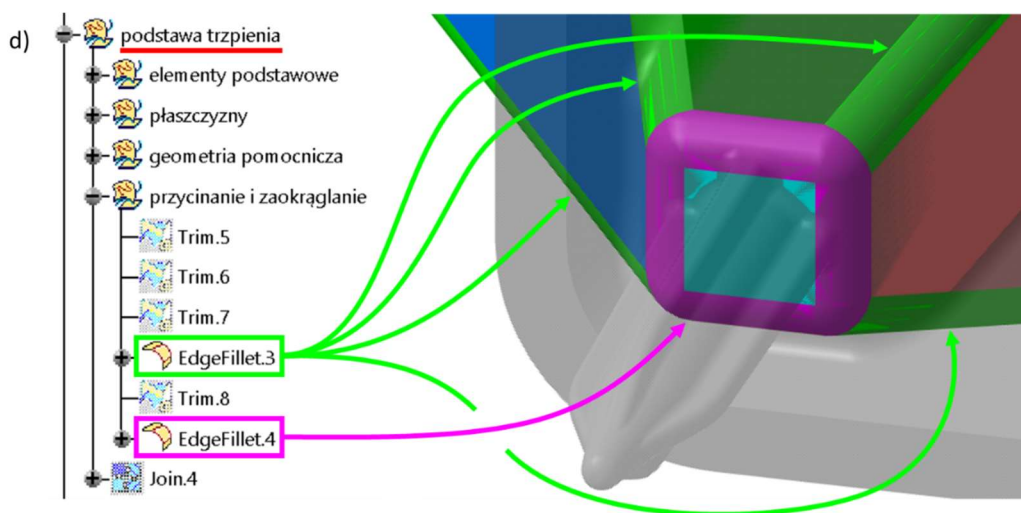
- 1) Przecięcie asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.3* z płaszczyzną *Plane.21* (***Intersect.5***).
- 2) Przecięcie asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.3* z płaszczyzną *Plane.22* (***Intersect.6***).
- 3) Przecięcie asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.3* z płaszczyzną *Plane.23* (***Intersect.7***).
- 4) Przecięcie asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.3* z płaszczyzną *Plane.24* (***Intersect.8***).
- 5) Powierzchnia pochylona o 20° do asocjatywnej kopii kierunku odformowania/montażu *Line.22* zbudowana w oparciu o przecięcie *Intersect.5* (***Sweep.5***).
- 6) Powierzchnia pochylona o 20° do asocjatywnej kopii kierunku odformowania/montażu *Line.22* zbudowana w oparciu o przecięcie *Intersect.6* (***Sweep.6***).
- 7) Powierzchnia pochylona o 20° do asocjatywnej kopii kierunku odformowania/montażu *Line.22* zbudowana w oparciu o przecięcie *Intersect.7* (***Sweep.7***).
- 8) Powierzchnia pochylona o 20° do asocjatywnej kopii kierunku odformowania/montażu *Line.22* zbudowana w oparciu o przecięcie *Intersect.8* (***Sweep.8***).

*Przycinanie i zaokrąglanie* (rys. Z16d):

Wraz z głównym zbiorem geometrii *podstawa trzpienia* autor wprowadził nowy rodzaj zbioru pomocniczego – *przycinanie i zaokrąglanie*, w celu zwiększenia czytelności rozrastającej się topologii powierzchniowej. Jak sama nazwa wskazuje, znalazła się tu przycięta geometria podstawy trzpienia, a niektóre jej krawędzie zostały zaokrąglone. Temat zasadności zaokrąglania krawędzi na etapie tworzenia topologii powierzchniowej i bryłowej został szerzej poruszony w punkcie 4 niniejszego Załącznika dotyczącym optymalizacji bryłowej topologii modelu 3D.

- 1) Przycięcie powierzchni *Sweep.5* i *Sweep.7* (***Trim.5***).
- 2) Przycięcie powierzchni *Sweep.6* i *Trim.5* (***Trim.6***).
- 3) Przycięcie powierzchni *Sweep.8* i *Trim.6* (***Trim.7***).
- 4) Zaokrąglanie krawędzi powierzchni *Trim.7* (***EdgeFillet.3***).
- 5) Przycięcie asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.3* i powierzchni *EdgeFillet.3* (***Trim.8***).
- 6) Zaokrąglanie krawędzi powierzchni *Trim.8* (***EdgeFillet.4***).





Rys. Z16. Topologia podstawy *Join.4* Trzpienia Pozycjonującego: a) *elementy podstawowe*, b) *płaszczyzny*, c) *geometria pomocnicza*, d) *prycinanie i zaokrąglanie*

Podstawa trzpienia (**Join.4**) została utworzona przy użyciu narzędzia programowego *Join* z wykorzystaniem powierzchni *EdgeFillet.4* (rys. Z17).



Rys. Z17. Podstawa *Join.4* Trzpienia Pozycjonującego utworzona przy użyciu narzędzia programowego *Join*

### **Rdzeń trzpienia (Join.5)**

*Elementy podstawowe* (rys. Z18a):

- 1) Asocjatywna kopia powierzchni głównej *Join.3* (**Surface.2**).
- 2) Asocjatywna kopia cylindrycznej powierzchni *Sweep.9* (**Surface.13**).
- 3) Asocjatywna kopia linii definiującej oś X lokalnego układu współrzędnych *Linie.14* (**Line.16**).
- 4) Asocjatywna kopia kierunku odformowania/montażu *Line.2* (**Line.23**).

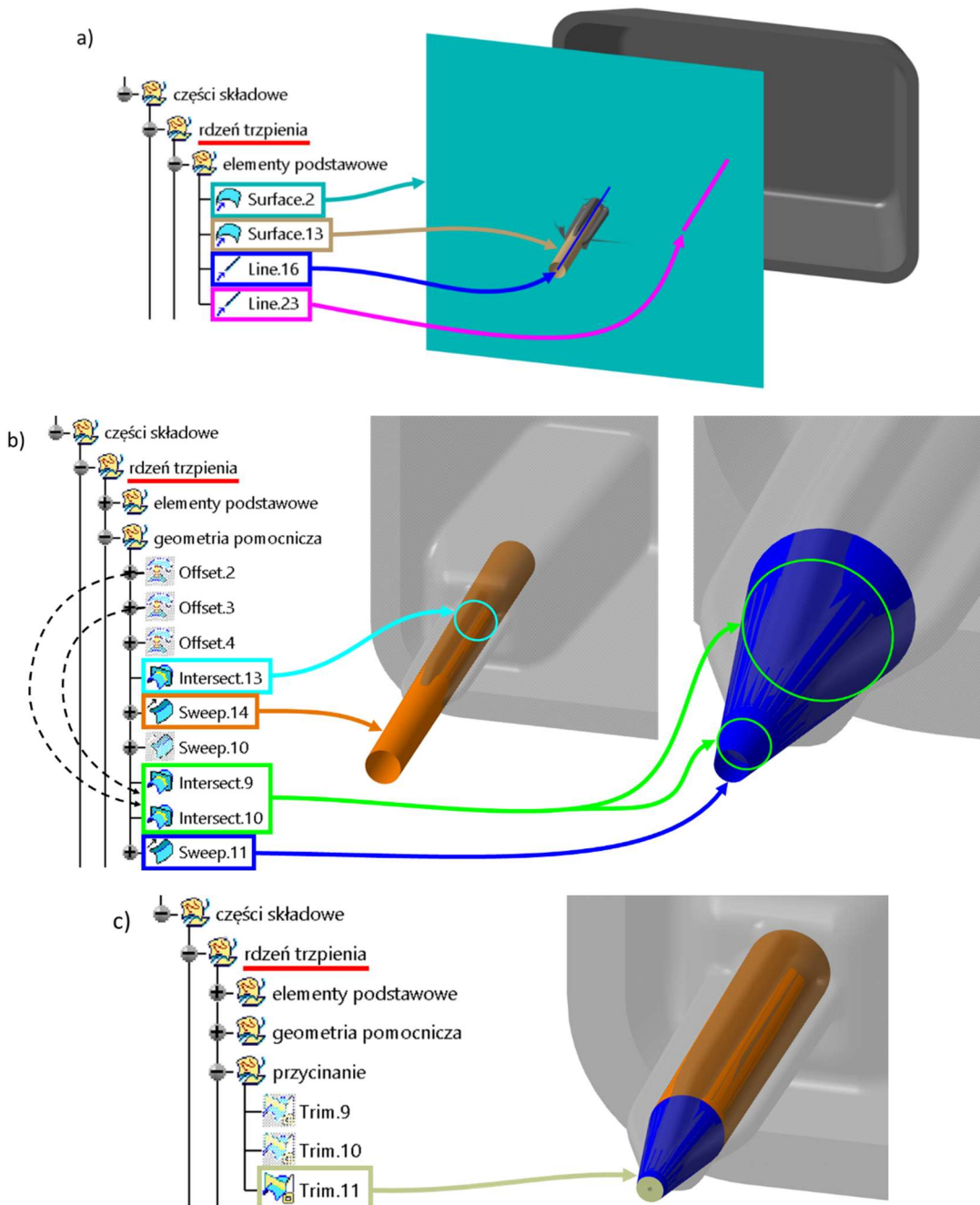
*Geometria pomocnicza* (rys. Z18b):

- 1) Powierzchnia odsunięta od asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.2* o 12 mm (**Offset.2**).
- 2) Powierzchnia odsunięta od powierzchni *Offset.2* o 5 mm (**Offset.3**).
- 3) Powierzchnia odsunięta od asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.2* o 2 mm (**Offset.4**).
- 4) Przecięcie asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.2* z asocjatywną kopią cylindrycznej powierzchni *Surface.13* (**Intersect.13**).
- 5) Stożkowa powierzchnia pochylona o  $0,5^\circ$  do asocjatywnej kopii kierunku odformowania/montażu *Line.23* zbudowana w oparciu o przecięcie *Intersect.13* (**Sweep.14**).

- 6) Cylindryczna powierzchnia o promieniu 0,5 mm zbudowana w oparciu o asocjatywną kopię linii definiującej oś X lokalnego układu współrzędnych *Line.16* (*Sweep.10*).
- 7) Przecięcie powierzchni *Offset.2* ze stożkową powierzchnią *Sweep.14* (*Intersect.9*).
- 8) Przecięcie powierzchni *Offset.3* z cylindryczną powierzchnią *Sweep.10* (*Intersect.10*).
- 9) Stożkowa powierzchnia zbudowana w oparciu o przecięcia powierzchni *Intersect.9* i *Intersect.10* (*Sweep.11*).

Przycinanie (rys. Z18c):

- 1) Przycięcie stożkowych powierzchni *Sweep.11* i *Sweep.14* (*Trim.9*).
- 2) Przycięcie powierzchni *Offset.3* i *Trim.9* (*Trim.10*).
- 3) Przycięcie powierzchni *Offset.4* i *Trim.10* (*Trim.11*).



Rys. Z18. Topologia rdzenia *Join.5* Trzpienia *Pozycjonującego*: a) *elementy podstawowe*, b) *geometria pomocnicza*, c) *przycinanie*



Rdzeń trzpienia (**Join.5**) został utworzony przy użyciu narzędzia programowego *Join* z wykorzystaniem powierzchni *Trim.11* (rys. Z19).

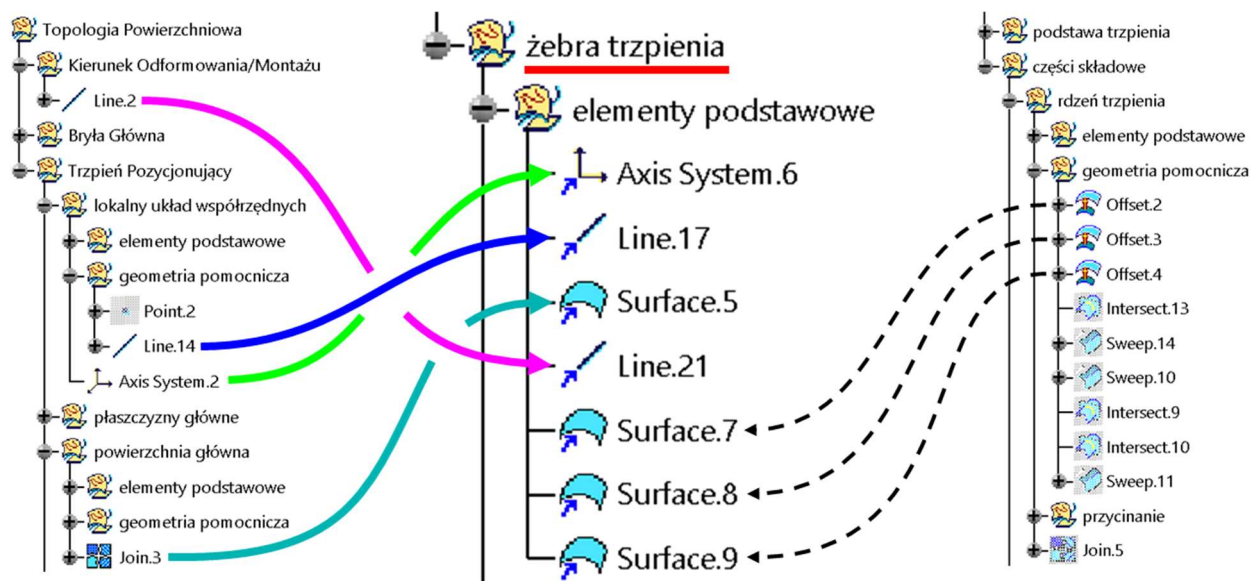


Rys. Z19. Rdzeń *Join.5* Trzpienia Pozycjonującego utworzony przy użyciu narzędzia programowego *Join*

### Żebra trzpienia (*Join.6, Join.7*)

Elementy podstawowe żebrow trzpienia (rys. Z20):

- 1) Asocjatywna kopia lokalnego układu współrzędnych *Axis System.2* (**Axis System.6**).
- 2) Asocjatywna kopia linii definiującej oś X lokalnego układu współrzędnych *Line.14* (**Line.17**).
- 3) Asocjatywna kopia powierzchni głównej *Join.3* (**Surface.5**).
- 4) Asocjatywna kopia kierunku odformowania/montażu *Line.2* (**Line.21**).
- 5) Asocjatywna kopia powierzchni *Offset.2* (**Surface.7**).
- 6) Asocjatywna kopia powierzchni *Offset.3* (**Surface.8**).
- 7) Asocjatywna kopia powierzchni *Offset.4* (**Surface.9**).



Rys. Z20. Elementy podstawowe topologii żebrow *Join.6* i *Join.7* Trzpienia Pozycjonującego

### Płaszczyzny żeber trzpienia:

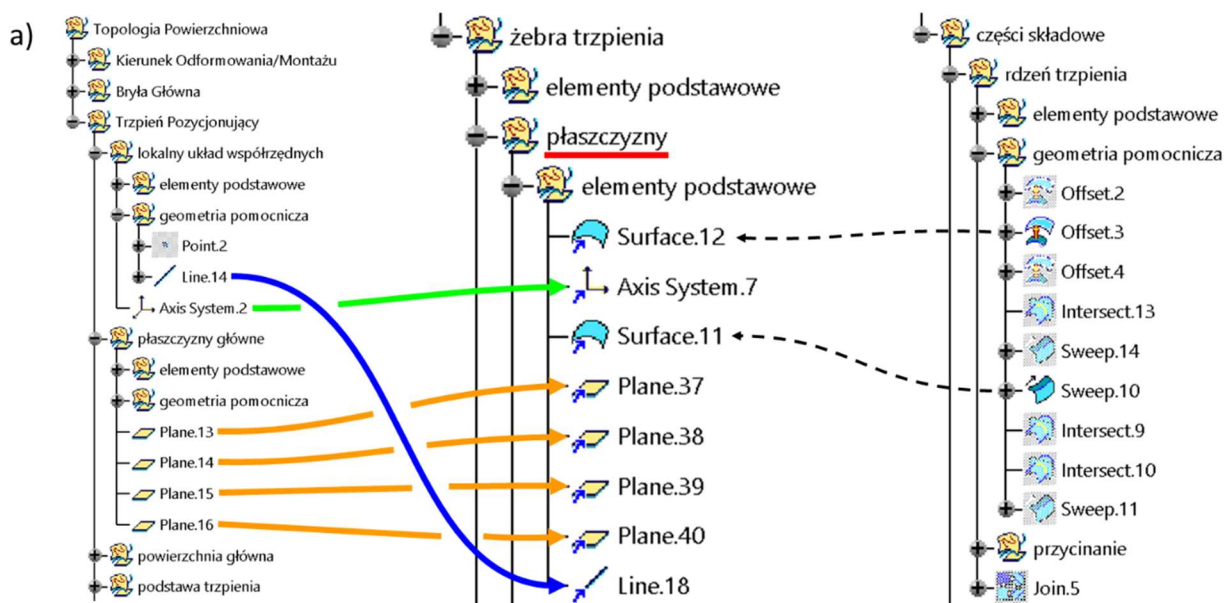
Analogicznie do *podstawy trzpienia* autor wprowadził do zbioru głównego *żebra trzpienia* osobny zbiór pomocniczy składający się tylko z płaszczyzn. Jednak tym razem do utworzenia tych płaszczyzn autor wprowadził dodatkowe zbiory geometrii elementów podstawowych oraz geometrii pomocniczej. Czy było to konieczne? Nie, bo mogły one być zastąpione zbiorami znajdującymi się bezpośrednio w zbiorze *żebra trzpienia*. Mimo wszystko autor uznał, że rozdzielanie tych geometrii jest zasadne w kontekście lepszej czytelności topologii powierzchniowej.

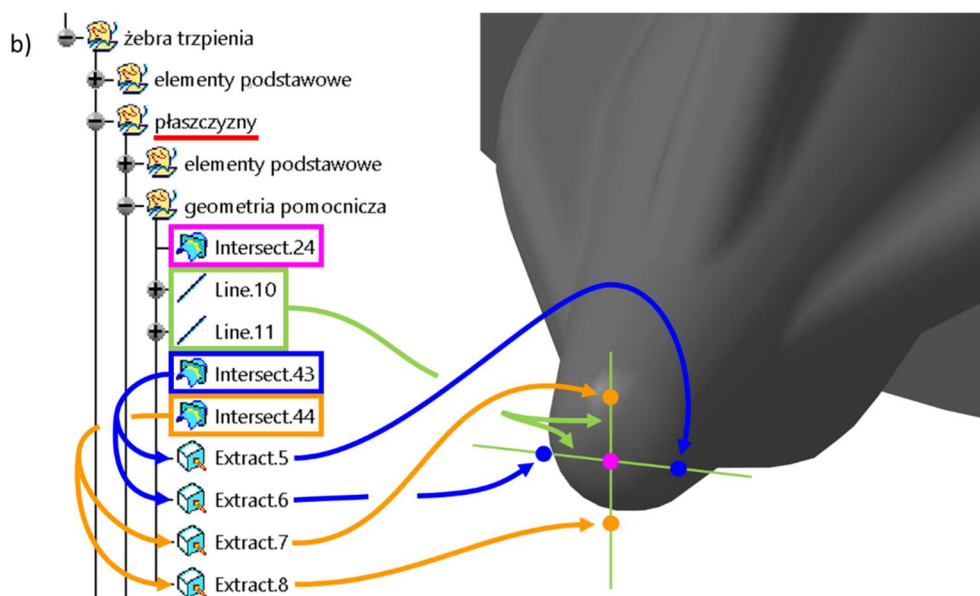
*Elementy podstawowe płaszczyzn* (rys. Z21a):

- 1) Asocjatywna kopia powierzchni *Offset.3 (Surface.12)*.
- 2) Asocjatywna kopia lokalnego układu współrzędnych *Axis System.2 (Axis System.7)*.
- 3) Asocjatywna kopia cylindrycznej powierzchni *Sweep.10 (Surface.11)*.
- 4) Asocjatywna kopia płaszczyzny głównej *Plane.13 (Plane.37)*.
- 5) Asocjatywna kopia płaszczyzny głównej *Plane.14 (Plane.38)*.
- 6) Asocjatywna kopia płaszczyzny głównej *Plane.15 (Plane.39)*.
- 7) Asocjatywna kopia płaszczyzny głównej *Plane.16 (Plane.40)*.
- 8) Asocjatywna kopia linii definiującej oś X lokalnego układu współrzędnych *Line.14 (Line.18)*.

*Geometria pomocnicza płaszczyzn* (rys. Z21b):

- 1) Przecięcie asocjatywnej kopii powierzchni *Surface.12* z asocjatywną kopią linii definiującej oś X lokalnego układu współrzędnych *Line.18 (Intersect.24)*.
- 2) Linia pozioma wzdłuż osi Y asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* o długości 10 mm przechodząca przez przecięcie *Intersect.24 (Line.10)*.
- 3) Linia pionowa wzdłuż osi Z asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* o długości 10 mm przechodząca przez przecięcie *Intersect.24 (Line.11)*.
- 4) Punkty przecięcia asocjatywnej kopii cylindrycznej powierzchni *Surface.11* z linią poziomą *Line.10 (Intersect.43)*.
- 5) Punkty przecięcia asocjatywnej kopii cylindrycznej powierzchni *Surface.11* z linią pionową *Line.11 (Intersect.44)*.
- 6) Wyodrębnione punkty przecięć *Intersect.43* i *Intersect.44 (Extract.5, Extract.6, Extract.7, Extract.8)*.



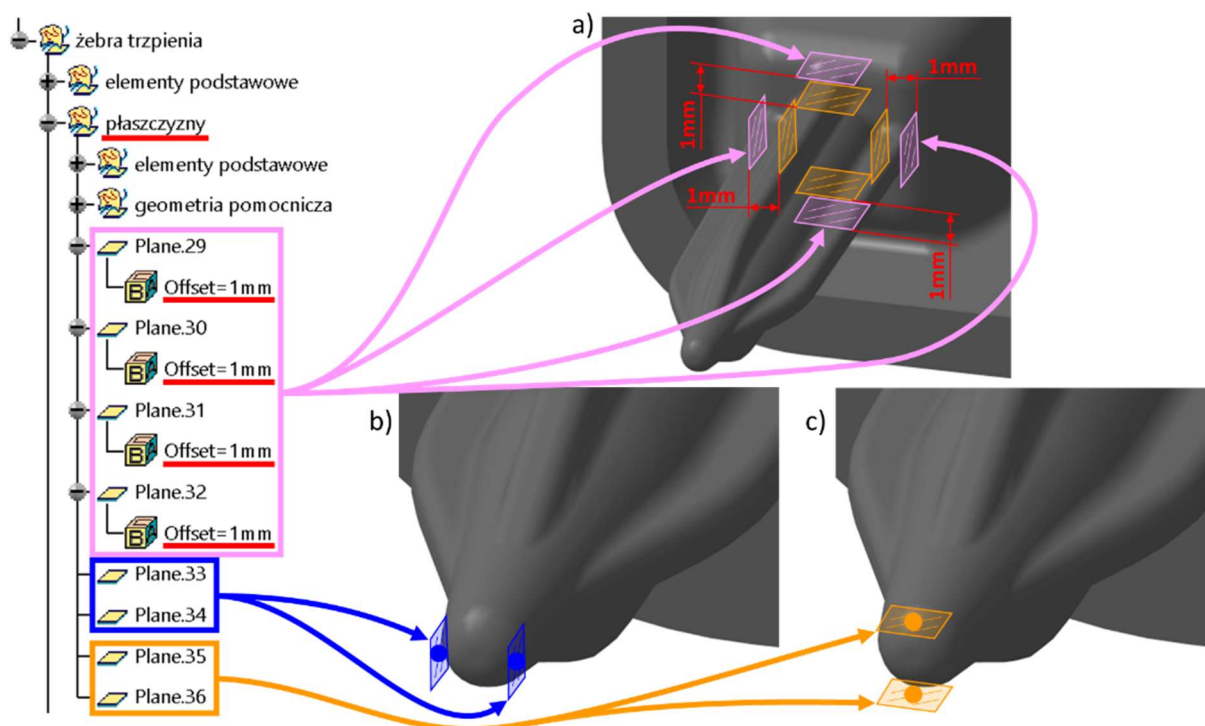


Rys. Z21. Topologia płaszczyzn żeber *Trzpienia Pozycjonującego*: a) *elementy podstawowe*, b) *geometria pomocnicza*

Płaszczyzny *Plane.29*, *Plane.30*, *Plane.31* i *Plane.32* zostały odsunięte od asocjatywnych kopii płaszczyzn głównych *Plane.37*, *Plane.38*, *Plane.39* i *Plane.40* o 1 mm (rys. Z22a).

Płaszczyzny *Plane.33* i *Plane.34* zostały utworzone w taki sposób, aby zachowywać równoległość do płaszczyzny XZ asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* i przechodzić przez wyodrębnione punkty *Extract.5* i *Extract.6* (rys. Z22b).

Płaszczyzny *Plane.35* i *Plane.36* zostały utworzone w taki sposób, aby zachowywać równoległość do płaszczyzny XY asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* i przechodzić przez wyodrębnione punkty *Extract.7* i *Extract.8* (rys. Z22c).

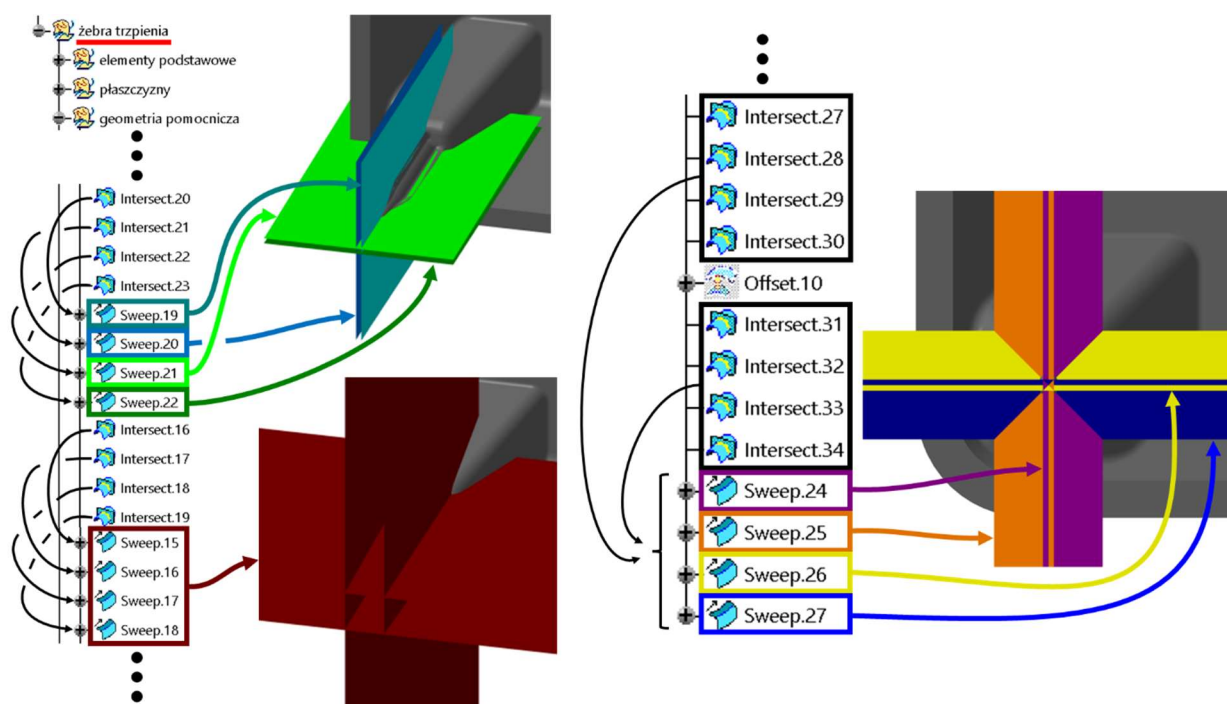


Rys. Z22. Płaszczyzny topologii żeber *Trzpienia Pozycjonującego*: a) *Plane.29*, *Plane.30*, *Plane.31* i *Plane.32* – płaszczyzny odsunięte od asocjatywnych kopii płaszczyzn głównych

*Plane.37, Plane.38, Plane.39 i Plane.40* o 1 mm, b) *Plane.33 i Plane.34* – płaszczyzny równoległe do płaszczyzny XZ asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* przechodzące przez wyodrębnione punkty *Extract.5 i Extract.6*, c) *Plane.35 i Plane.36* – płaszczyzny równoległe do płaszczyzny XY asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.7* przechodzące przez wyodrębnione punkty *Extract.7 i Extract.8*

*Geometria pomocnicza* żeber trzpienia (rys. Z23):

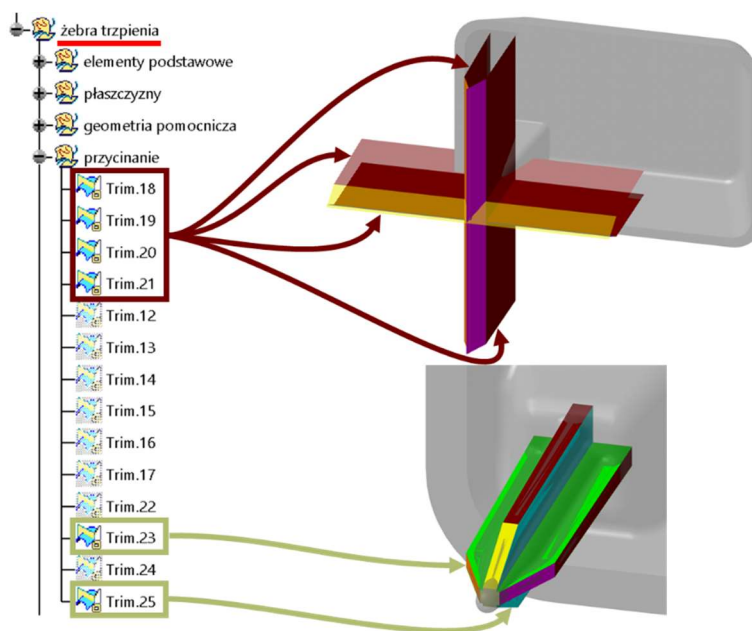
- 1) Powierzchnia utworzona przez wyciągnięcie asocjatywnej kopii linii definiującej oś X lokalnego układu współrzędnych *Line.17* wzdłuż osi Y asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.6* na długość 20 mm (***Extrude.4***).
- 2) Powierzchnia utworzona przez wyciągnięcie asocjatywnej kopii linii definiującej oś X lokalnego układu współrzędnych *Line.17* wzdłuż osi Z asocjatywnej kopii lokalnego układu współrzędnych *Axis System.6* na długość 20 mm (***Extrude.5***).
- 3) Powierzchnie odsunięte od powierzchni *Extrude.4* w obie strony o 0,5 mm (***Offset.5, Offset.6***).
- 4) Powierzchnie odsunięte od powierzchni *Extrude.5* w obie strony o 0,5 mm (***Offset.7, Offset.8***).
- 5) Przecięcia asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.5* z powierzchniami *Offset.5, Offset.6, Offset.7 i Offset.8* (***Intersect.20, Intersect.21, Intersect.22, Intersect.23***).
- 6) Powierzchnie pochylone o  $0,5^\circ$  do asocjatywnej kopii kierunku odformowania/montażu *Line.21* zbudowane w oparciu o przecięcia *Intersect.20, Intersect.21, Intersect.22 i Intersect.23* (***Sweep.19, Sweep.20, Sweep.21, Sweep.22***).
- 7) Przecięcia asocjatywnej kopii powierzchni głównej *Surface.5* z płaszczyznami *Plane.29, Plane.30, Plane.31 i Plane.32* (***Intersect.16, Intersect.17, Intersect.18, Intersect.19***).
- 8) Powierzchnie pochylone o  $1^\circ$  do asocjatywnej kopii kierunku odformowania/montażu *Line.21* zbudowane w oparciu o przecięcia *Intersect.16, Intersect.17, Intersect.18 i Intersect.19* (***Sweep.15, Sweep.16, Sweep.17, Sweep.18***).
- 9) Przecięcia asocjatywnej kopii powierzchni *Surface.7* z powierzchniami *Sweep.15, Sweep.16, Sweep.17 i Sweep.18* (***Intersect.27, Intersect.28, Intersect.29, Intersect.30***).
- 10) Powierzchnia odsunięta od asocjatywnej kopii powierzchni *Surface.8* o 1 mm (***Offset.10***).
- 11) Przecięcia powierzchni *Offset.10* z płaszczyznami *Plane.33, Plane.34, Plane.35 i Plane.36* (***Intersect.31, Intersect.32, Intersect.33, Intersect.34***).
- 12) Powierzchnia rozciągnięta między dwoma przecięciami *Intersect.27 i Intersect.31* (***Sweep.24***).
- 13) Powierzchnia rozciągnięta między dwoma przecięciami *Intersect.28 i Intersect.32* (***Sweep.25***).
- 14) Powierzchnia rozciągnięta między dwoma przecięciami *Intersect.29 i Intersect.33* (***Sweep.26***).
- 15) Powierzchnia rozciągnięta między dwoma przecięciami *Intersect.30 i Intersect.34* (***Sweep.27***).



Rys. Z23. Geometria pomocnicza topologii żeber Join.6 i Join.7 Trzpienia Pozycjonującego

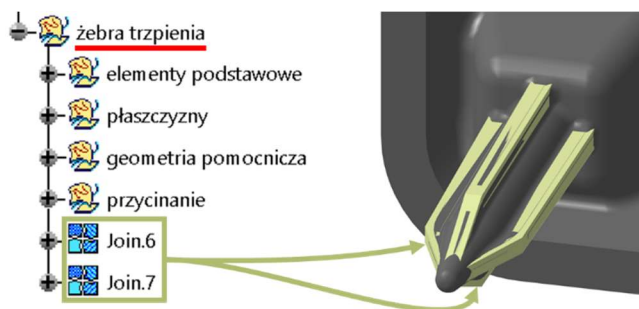
Przycinanie (rys. Z24):

- 1) Przycięcie powierzchni Sweep.15 i Sweep.24 (**Trim.18**).
- 2) Przycięcie powierzchni Sweep.16 i Sweep.25 (**Trim.19**).
- 3) Przycięcie powierzchni Sweep.17 i Sweep.26 (**Trim.20**).
- 4) Przycięcie powierzchni Sweep.18 i Sweep.27 (**Trim.21**).
- 5) Przycięcie powierzchni Sweep.20 i Trim.19 (**Trim.12**).
- 6) Przycięcie powierzchni Trim.12 i Trim.18 (**Trim.13**).
- 7) Przycięcie powierzchni Sweep.19 i Trim.13 (**Trim.14**).
- 8) Przycięcie powierzchni Sweep.21 i Trim.20 (**Trim.15**).
- 9) Przycięcie powierzchni Trim.15 i Trim.21 (**Trim.16**).
- 10) Przycięcie powierzchni Sweep.22 i Trim.16 (**Trim.17**).
- 11) Przycięcie powierzchni Offset.10 i Trim.14 (**Trim.22**).
- 12) Przycięcie asocjatywnej kopii powierzchni Surface.9 i powierzchni Trim.22 (**Trim.23**).
- 13) Przycięcie powierzchni Offset.10 i Trim.17 (**Trim.24**).
- 14) Przycięcie asocjatywnej kopii powierzchni Surface.9 i powierzchni Trim.24 (**Trim.25**).



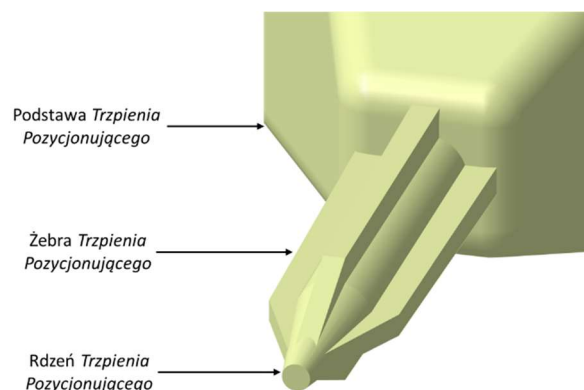
Rys. Z24. Przcycinanie geometrii topologii żeber *Join.6* i *Join.7* *Trzpienia Pozycjonującego*

Żebra trzpienia zostały utworzone przy użyciu narzędzia programowego *Join* z wykorzystaniem powierzchni *Trim.23 (Join.6)* i *Trim.25 (Join.7)* (rys. Z25).

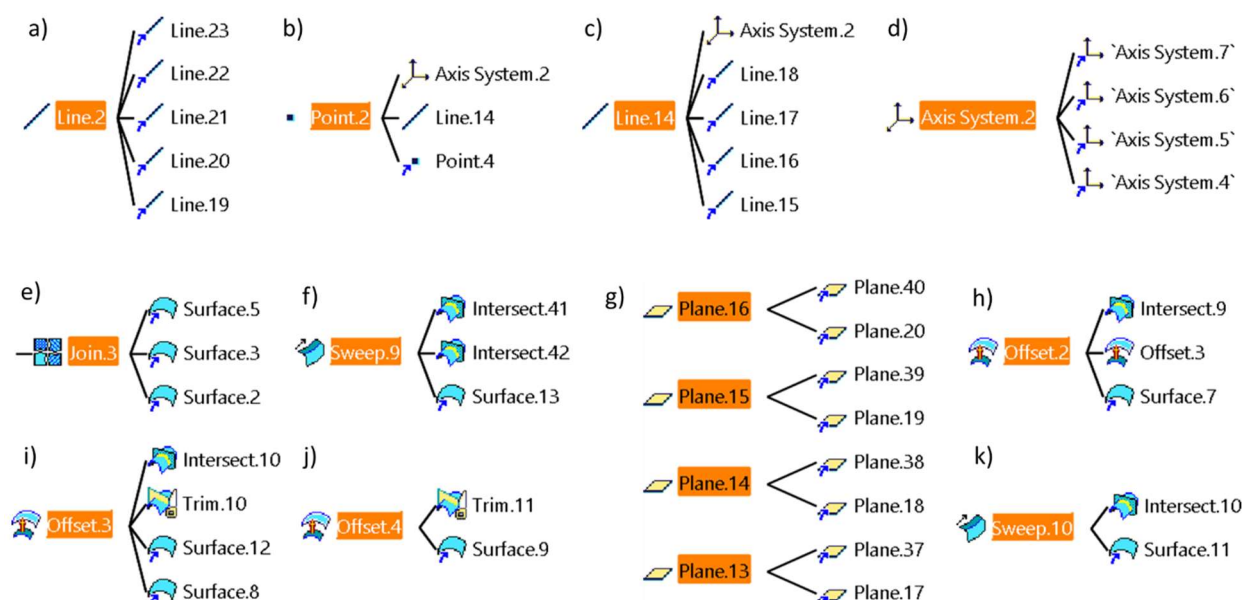


Rys. Z25. Żebra *Join.6* i *Join.7* *Trzpienia Pozycjonującego* utworzone przy użyciu narzędzia programowego *Join*

W powyższej procedurze konstrukcyjnej utworzono trzy integralne części powierzchniowe *Trzpienia Pozycjonującego*, które zostały bezpośrednio wykorzystane na kolejnym etapie badań – przygotowywania topologii bryłowej: podstawa, rdzeń i żebra (rys. Z26). Natomiast na rysunku Z27 przedstawiono wszystkie użyte w tej procedurze elementy podstawowe.

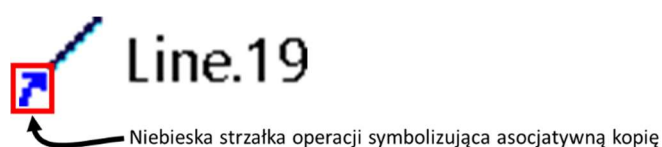


Rys. Z26. Geometria powierzchniowa *Trzpienia Pozycjonującego* bezpośrednio wykorzystana w jego topologii bryłowej (podstawa, rdzeń, żebra)



Rys. Z27. Elementy podstawowe użyte na kolejnych etapach tworzenia topologii powierzchniowej trzpienia: a) kierunek odformowania/montażu – użyty pięć razy, b) punkt definiujący pozycję lokalnego układu współrzędnych w przestrzeni – użyty trzy razy, c) linia definiująca oś X lokalnego układu współrzędnych – użyta pięć razy, d) lokalny układ współrzędnych – użyty cztery razy, e) powierzchnia główna – użyta trzy razy, f) cylindryczna powierzchnia o promieniu 1,5 mm – użyta trzy razy g) płaszczyzny główne – każda płaszczyzna użyta dwa razy, h) powierzchnia odsunięta od asocjatywnej kopii powierzchni głównej o 12 mm – użyta trzy razy, i) powierzchnia odsunięta od powierzchni Offset.2 o 5 mm – użyta cztery razy, j) powierzchnia odsunięta od asocjatywnej kopii powierzchni głównej o 2 mm – użyta dwa razy, k) cylindryczna powierzchnia o promieniu 0,5 mm – użyta dwa razy

Autor elementom wykorzystanym w innych niż ich pierwotna lokalizacja zestawach geometrycznych nadał dodatkową postać asocjatywnych kopii, co w przypadku systemu CATIA V5 symbolizuje niebieska strzałka w lewym dolnym narożniku ikony danej operacji (rys. Z28).

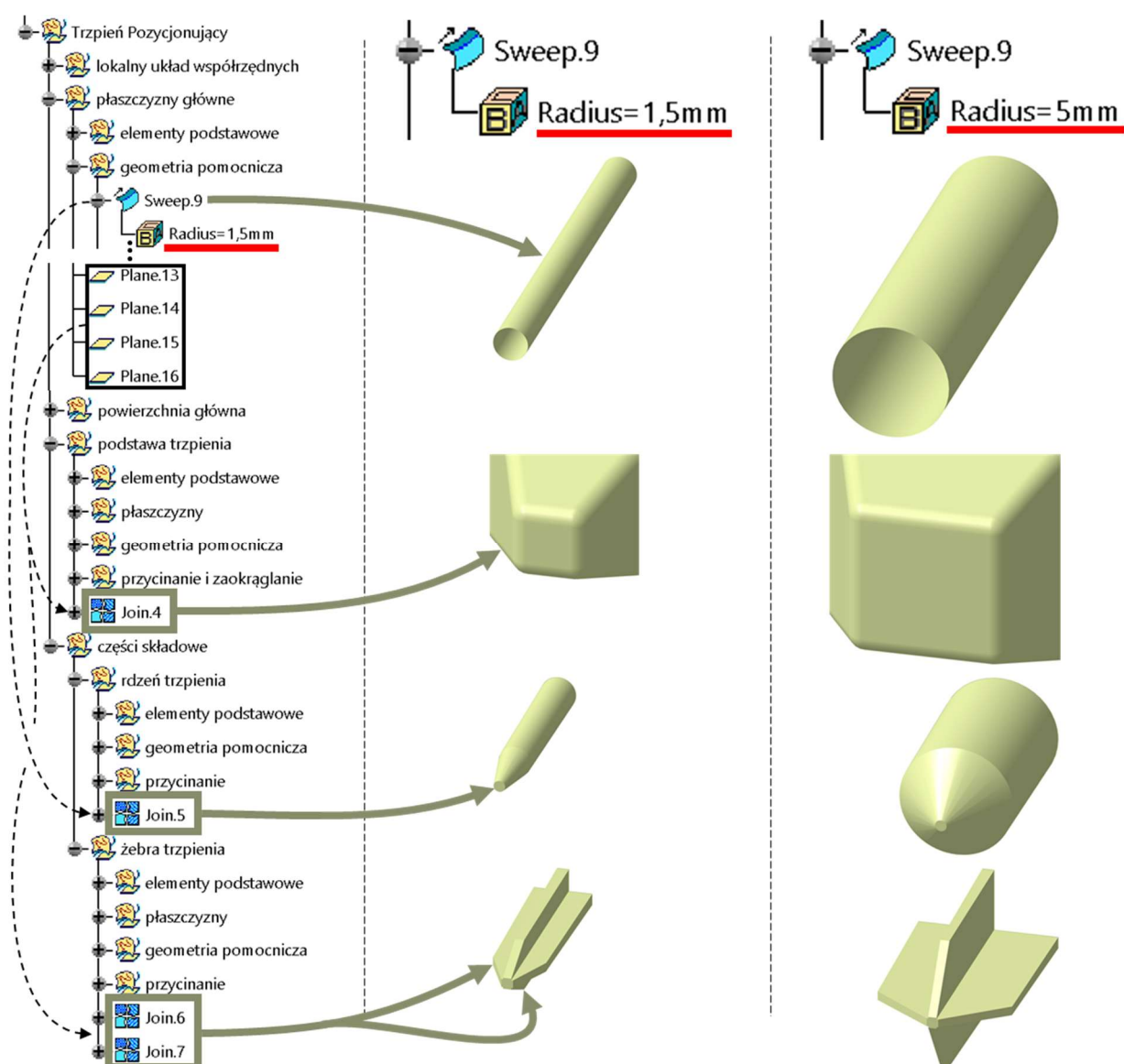


Rys. Z28. Ikona operacji modelowania reprezentująca jej asocjatywną kopię

Taki stan przedstawia rysunek Z27a, na którym linia *Line.2* posiada pięć kopii (*Line.19*, *Line.20*, *Line.21*, *Line.22*, *Line.23*), co oznacza, że została użyta w pięciu różnych zbiorach geometrii. Natomiast elementy potrzebne do budowy geometrii znajdującej się w obrębie tej samej lokalizacji, to znaczy w obrębie jednego głównego zestawu geometrycznego, zostały wykorzystane w sposób bezpośredni – bez użycia asocjatywnej kopii. Nie znaczy to jednak, że asocjatywność w takich przypadkach nie zachodziła. Jeśli geometria i wykorzystany do jej utworzenia element podstawowy znajdują się w tym samym zbiorze geometrycznym, to zdaniem autora, tworzenie dodatkowych kopii nie jest konieczne. Taki stan przedstawia rysunek Z27b, na którym punkt *Point.2* jest bezpośrednio powiązany z geometrią w postaci układu współrzędnych *Axis System.2* i linii *Line.14*, bo geometria ta zawierała się w obrębie jednego głównego zestawu

geometrycznego *lokalny układ współrzędnych* (rys. Z7). Dodatkowo, punkt *Point.2* został użyty poza tym zestawem, dlatego występuje w formie kopii *Point.4*.

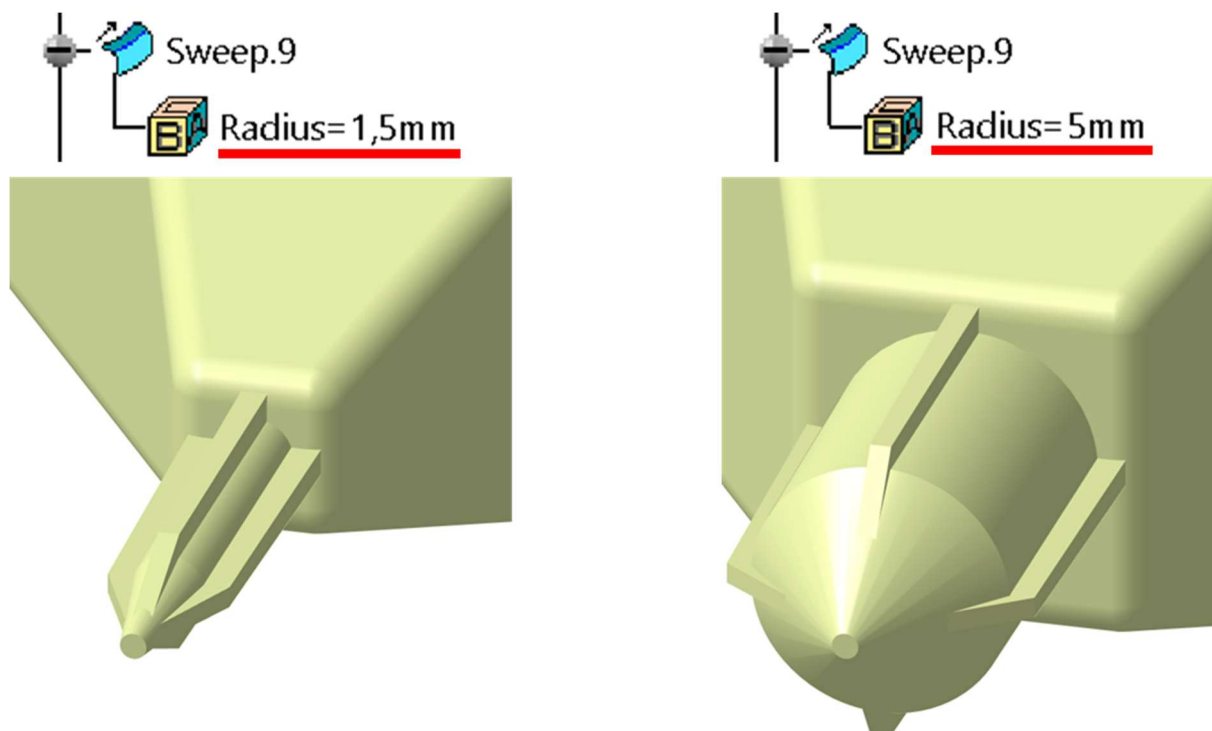
Rysunek Z27 oraz opisana wyżej procedura konstrukcyjna pozwalają wyciągnąć prosty wniosek, że użycie elementów podstawowych w powierzchniowej topologii trzpienia pozwoliło na ograniczenie operacji modelowania, za pomocą których autor kontrolował jego wspólne rejony z czterdziestu dwóch do czternastu. Poprzez parametryczną zmianę jednej z takich operacji, a także dzięki przemyślanej sieci powiązań między nimi, autor mógł równocześnie zmieniać postać geometryczną więcej niż jednej części składowej danego podmiotu. Przykładowo, zmiana promienia cylindrycznej powierzchni *Sweep.9*, która pod postacią asocjatywnej kopii *Surface.13* odpowiadała za zmianę promienia rdzenia trzpienia, powodowała zmianę położenia płaszczyzn głównych *Plane.13*, *Plane.14*, *Plane.15* i *Plane.16*, które w postaci asocjatywnych kopii wpływały na zmianę wielkości podstawy trzpienia oraz jego żeber (rys. Z29). Zatem autor dokonywał zmiany trzpienia wielotorowo; równoległe; na jednym poziomie; można by stwierdzić – poziomo.



Rys. Z29. Przykładowa zmiana promienia cylindrycznej powierzchni *Sweep.9* z 1,5 mm na 5 mm powodująca jednoczesną zmianę części składowych trzpienia pozycjonującego – główna idea Modelowania Poziomego uzyskiwana poprzez optymalizację struktury modelu 3D



W konsekwencji za sprawą zmiany jednego parametru elementu podstawowego użytkownik jest w stanie zmienić postać geometryczną konkretnego podmiotu, a nawet całego modelu 3D (rys. Z30).

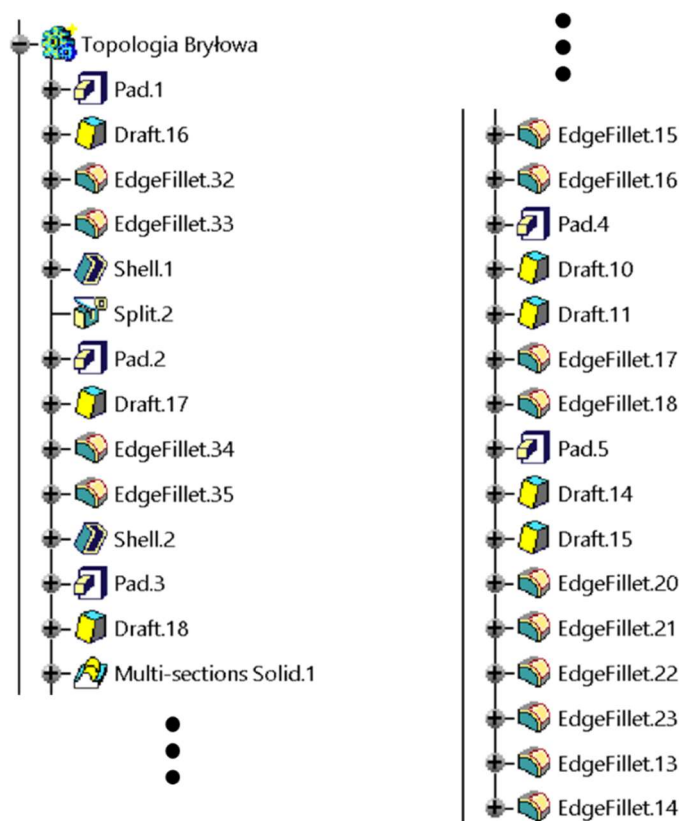


Rys. Z30. Rezultat zmiany parametru operacji *Sweep.9* oznaczający zmianę postaci geometrycznej części składowych *Trzpienia Pozycjonującego*, a w konsekwencji zmianę samego trzpienia

Powierzchniowa topologia *Trzpienia Pozycjonującego* została zakończona, ale nie oznaczało to, że jego model 3D został zakończony. Zgodnie z ideą Modelowania Hybrydowego oprócz topologii powierzchniowej należało przygotować też topologię bryłową, dzięki której model 3D *Trzpienia Pozycjonującego* miał być w pełni reprezentatywny w odniesieniu do wykonanego na jego bazie wytworu. Do utworzenia modelu bryłowego autor wykorzystał opisaną w punkcie 3.3.3 Rozdziału 3 niniejszej pracy technikę Modelowania Wieloobiektowego, która w przypadku budowania bryłowej topologii modelu 3D może niejako „przenikać się” z Modelowaniem Poziomym za sprawą wykorzystania w niej bryłowych odpowiedników elementów podstawowych. Umożliwia to konstruktorowi tworzenie integralnej sieci powiązań modeli CAD pozbawionej nadmiarowych zależności i stanowiącej spójną i logiczną całość.

### 3. Tworzenie topologii bryłowej modelu 3D przy użyciu techniki Modelowania Wieloobiektowego

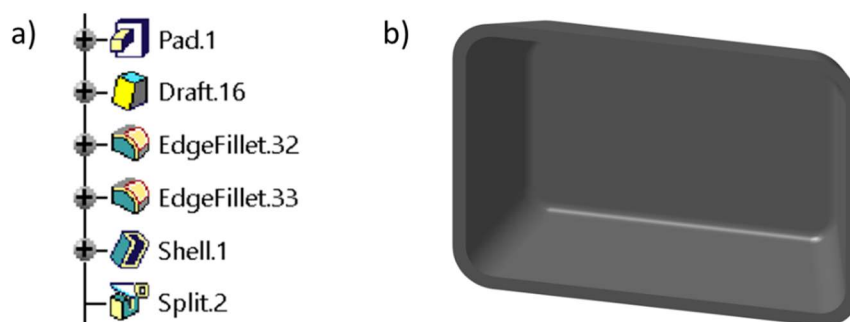
Badania nad bryłową topologią *Trzpienia Pozycjonującego* autor rozpoczął od utworzenia jego struktury bez uwzględnienia wytycznych Modelowania Wieloobiektowego. Taką topologię przedstawia rysunek Z31, w której kolejne jego cechy geometryczne zostały utworzone jedna po drugiej; szeregowo (liniowo). Z uwagi na fakt, że *Trzpień Pozycjonujący* jest integralną częścią *Komponentu Cienkościennego*, to bryłowa topologia tego trzpienia również powinna być integralną częścią komponentu. Dlatego też w dalszym opisie drzewa struktury modelu 3D uwzględniono operacje, za pomocą których utworzono także ów *Komponent Cienkościenny*.



Rys. Z31. Topologia bryłowa *Komponentu Cienkościennego* utworzona w sposób liniowy

Powyższą strukturę rozpoczęto od utworzenia „pustego” obiektu o nazwie *Topologia Bryłowa*, a następnie dodano kolejne operacje tworzące końcowy model 3D. Sześć pierwszych operacji odpowiadało za utworzenie bryły głównej *Komponentu Cienkościennego* (rys. Z32):

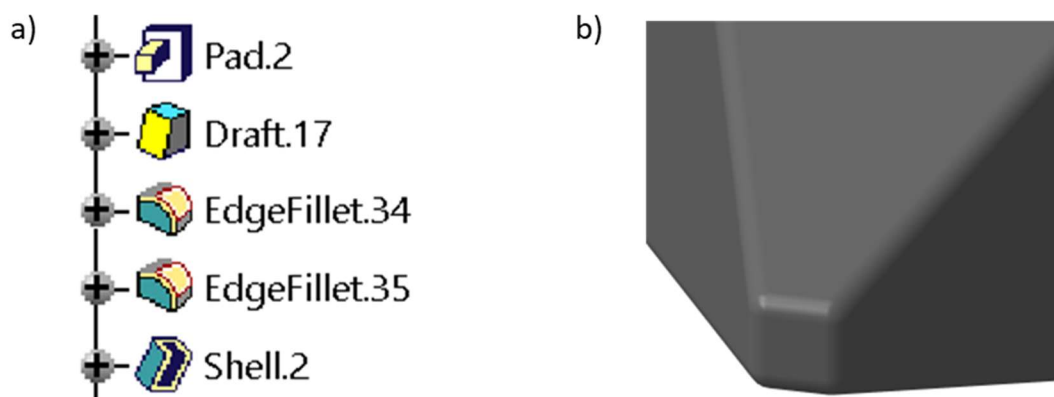
- 1) *Pad.1* – bryła bazowa,
- 2) *Draft.16*, *EdgeFillet.32*, *EdgeFillet.33* – cechy technologiczne bryły głównej: pochylenie ścian, zaokrąglenia,
- 3) *Shell.1* – nadanie bryle bazowej wymaganej cienkościenności,
- 4) *Split.2* – przycięcie bocznych ścian bryły bazowej na wymaganą wysokość.



Rys. Z32. *Komponent Cienkościenny*: a) liniowa topologia bryłowa, b) bryła główna *Komponentu Cienkościennego*

W następnej kolejności wygenerowano podstawę *Trzpienia Pozycjonującego* (rys. Z33):

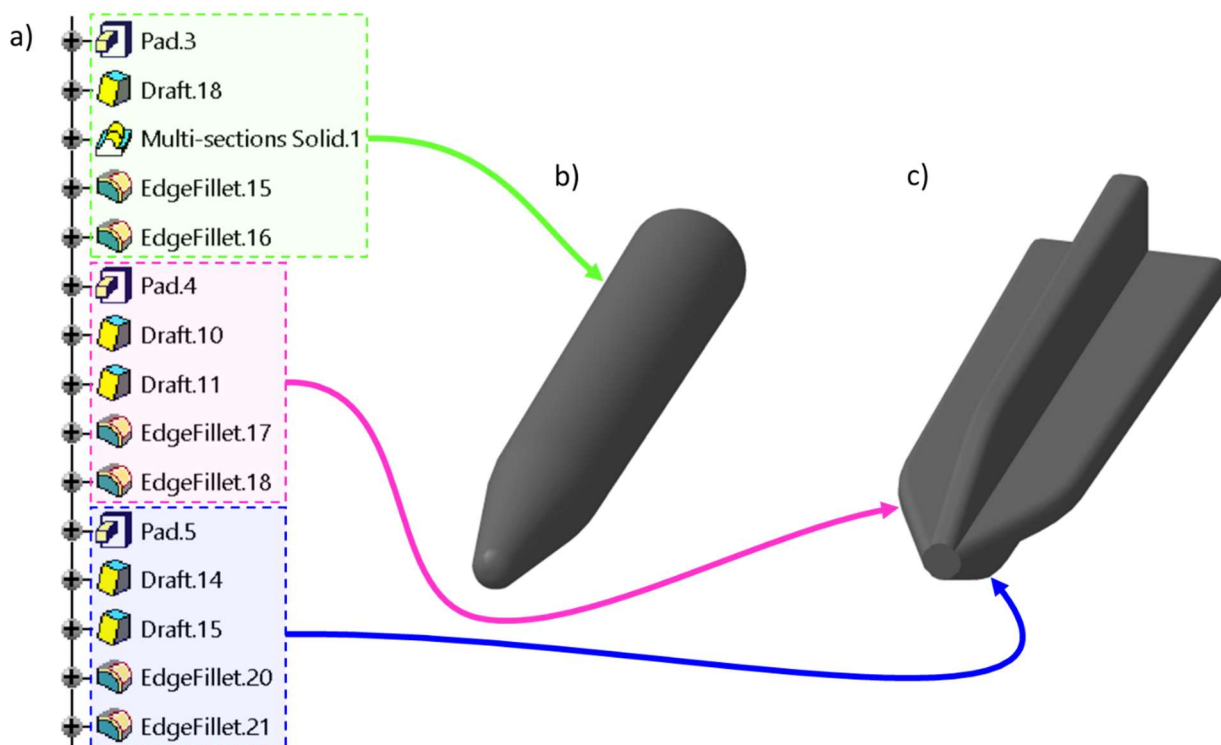
- 1) *Pad.2* – bryła bazowa,
- 2) *Draft.17*, *EdgeFillet.34*, *EdgeFillet.35* – cechy technologiczne podstawy trzpienia: pochylenie ścian, zaokrąglenia,
- 3) *Shell.2* – nadanie bryle bazowej wymaganej cienkościenności.



Rys. Z33. Komponent Cienkościenny: a) liniowa topologia bryłowa, b) podstawa Trzpienia Pozycjonującego

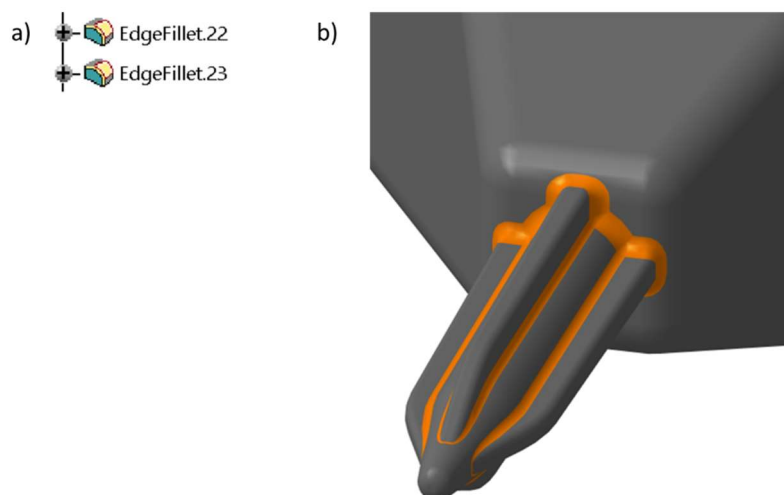
Kolejne operacje topologii reprezentowały części składowe trzpienia w postaci jego rdzenia oraz żeber (rys. Z34):

- 1) *Pad.3, Multi-sections Solid.1* – bryła bazowa rdzenia trzpienia,
- 2) *Pad.4, Pad.5* – bryły bazowe żeber trzpienia,
- 3) *Draft.18, EdgeFillet.15, EdgeFillet.16* – cechy technologiczne rdzenia trzpienia: pochylenie ścian, zaokrąglenia,
- 4) *Draft.10, Draft.11, Draft.14, Draft.15, EdgeFillet.17, EdgeFillet.18, EdgeFillet.20, EdgeFillet.21* – cechy technologiczne żeber trzpienia: pochylenia ścian, zaokrąglenia.

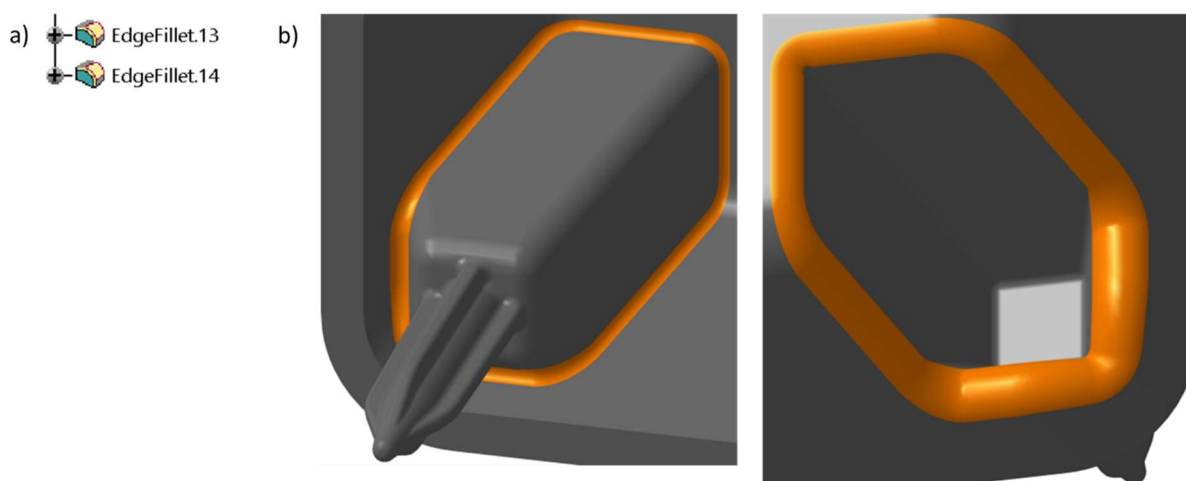


Rys. Z34. Komponent Cienkościenny: a) liniowa topologia bryłowa, b) rdzeń Trzpienia Pozycjonującego, c) żebra Trzpienia Pozycjonującego

Na końcu topologii dodano zaokrąglenia (*EdgeFillet.22, EdgeFillet.23*) wynikające z przecięcia się rdzenia, żeber i podstawy trzpienia (rys. Z35), a także zaokrąglenia (*EdgeFillet.13, EdgeFillet.14*) wynikające z przecięcia się Trzpienia Pozycjonującego z bryłą główną Komponentu Cienkościennego (rys. Z36).



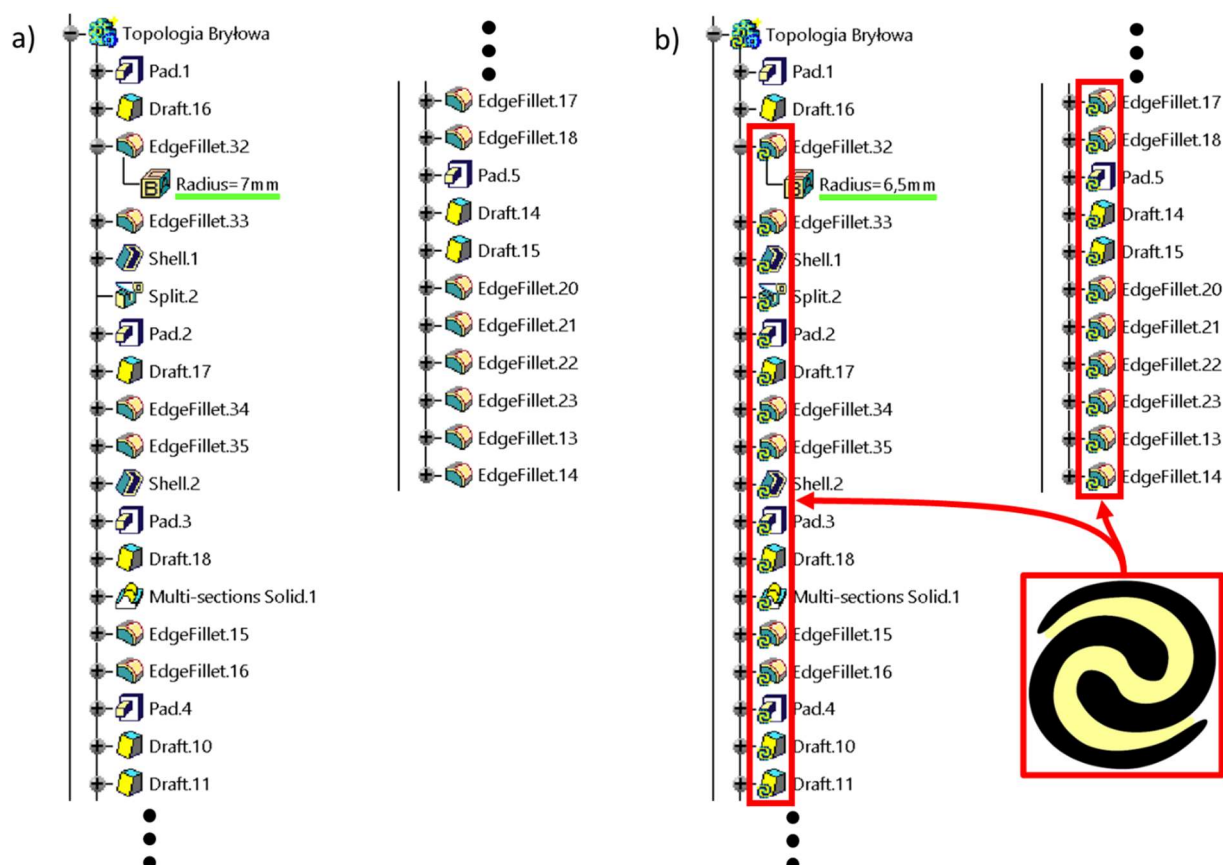
Rys. Z35. *Komponent Cienkościenny*: a) liniowa topologia bryłowa, b) zaokrąglenia wynikające z przecięcia się rdzenia, żeber i podstawy *Trzpienia Pozycjonującego*



Rys. Z36. *Komponent Cienkościenny*: a) liniowa topologia bryłowa, b) zaokrąglenia wynikające z przecięcia się *Trzpienia Pozycjonującego* z bryłą główną *Komponentu Cienkościennego*

O ile powyższe wyjaśnienie bryłowej topologii *Komponentu Cienkościennego* utworzonej w sposób liniowy i zilustrowanej na rysunku Z31 pozwala czytelnikowi zrozumieć funkcje poszczególnych jej operacji, tak zrozumienie jej bez przedstawionego wyjaśnienia nawet dla doświadczonego konstruktora byłoby trudne. Sytuację poprawiałoby dopasowanie nazw poszczególnych operacji topologii do ich funkcjonalności. Jednak z doświadczenia autora wynika, że o ile modyfikacja nazw poszczególnych operacji topologii bryłowej, jak i powierzchniowej rzeczywiście pozytywnie wpływa na ich czytelność zaraz po utworzeniu modelu 3D, tak dalsza praca z takim modelem wynikająca z wprowadzania do niego kolejnych zmian wymaga więcej czasu i uwagi konstruktora, by podczas dodawania nowych lub usuwania już istniejących operacji owej czytelności z tytułu zmienianych ich nazw nie zatracić. Zdaniem autora, w kwestii nazewnictwa struktury modelu 3D, zdecydowanie lepiej jest ograniczyć ją do ogólnych zbiorów geometrii takich jak zestawy geometryczne w topologii powierzchniowej, czy kolejno dodawanych obiektów w topologii bryłowej. Jednak problem z czytelnością topologii liniowej nie jest jedynym problemem „przemawiającym” za zastąpieniem jej topologią równoległą, czy też inaczej – niezależną, charakteryzującą Modelowanie Wieloobektowe. Brak wyodrębnienia poszczególnych części składowych modelu 3D powoduje, że cechy geometryczne są definiowane

w ogólnej strukturze modelu, a nie w strukturze tych części składowych, które te cechy tworzą. Innymi słowy, każda cecha geometryczna w topologii liniowej definiowana jest w kontekście całego projektowanego modelu 3D, a nie w kontekście jego części składowej, której ta cecha dotyczy [64]. Konsekwencją tej zależności może być sytuacja przedstawiona na rysunku Z37. O ile hierarchiczna struktura w postaci drzewa kolejno wykonywanych operacji jest we współczesnych systemach CAD standardową i jak dotąd najlepszą formą reprezentowania topologii modelu 3D, o tyle jego liniowa forma posiada istotną wadę w postaci braku stabilności strukturalnej podczas modyfikacji dowolnej jej operacji. Przykładowa modyfikacja odnosi się do jednego z początkowych promieni bryły głównej *Komponentu Cienkościennego*. Zmiana wartości operacji *EdgeFillet.32* z 7 mm na 6,5 mm „pociąga” za sobą konieczność aktualizacji wszystkich operacji znajdujących się poniżej jej samej.

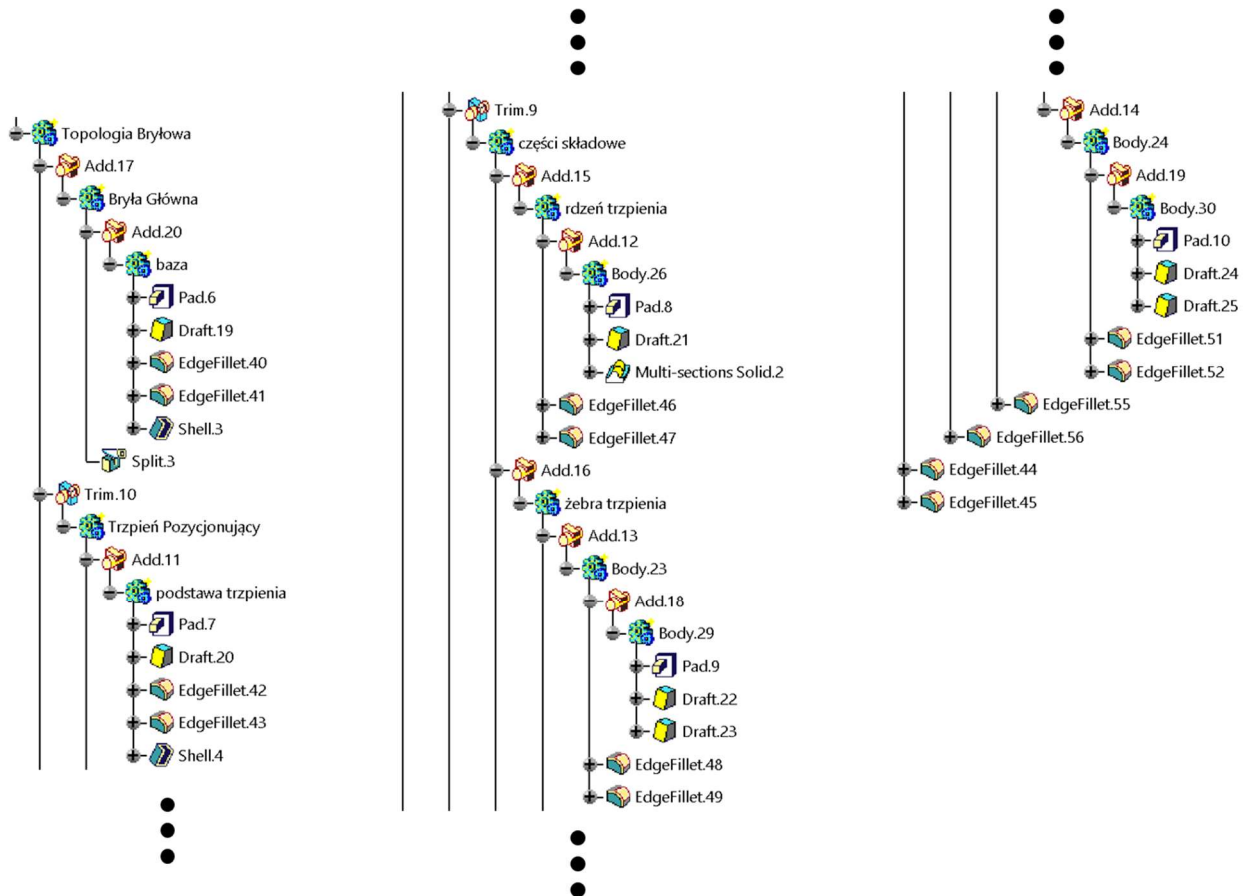


Rys. Z37. Modyfikacja promienia *EdgeFillet.32* liniowej topologii bryłowej *Komponentu Cienkościennego*: a) stan topologii przed modyfikacją promienia, b) stan topologii po modyfikacji promienia – ikona symbolizująca konieczność aktualizacji promienia *EdgeFillet.32*, jak i wszystkich operacji znajdujących się pod nią

Rozpatrywany model 3D *Komponentu Cienkościennego* posiadał prostą geometrię i strukturę. W przypadku złożonych geometrycznie i topologicznie modeli stabilność strukturalna jest ważnym elementem ich procesu aktualizacji, bo zauważalnie wpływa na czas jaki konstruktor musi na tę aktualizację poświęcić.

Kontynuując badania nad implementacją Modelowania Wieloobektowego do struktury modelu 3D, autor przygotował tę samą topologię bryłową *Komponentu Cienkościennego*, lecz tym razem poszczególne jego części składowe pogrupował w postaci osobnych brył, czyli obiektów, a obiekty te połączył za pomocą operacji Boole’owskich (rys. Z38). Na wstępie można zauważyć,

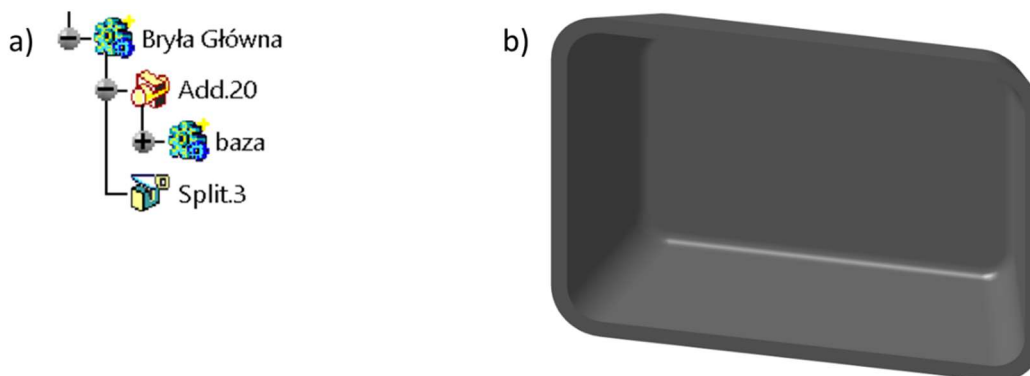
że topologia ta jest dłuższa od topologii liniowej i dodatkowo „rozciąga” się w poziomie tworząc tym samym strukturę równoległą. Warto też zauważyć, że nazwy niektórych obiektów pomocniczych nie zostały nadane przez autora, a przez system CAD (*Body.26*, *Body.23*, *Body.29*, *Body.24*, *Body.30*) – w sposób automatyczny. Kwestią indywidualną użytkownika jest to w jaki sposób będzie on nazywał kolejno dodawane do drzewa obiekty.



Rys. Z38. Bryłowa topologia *Komponentu Cienkościennego* utworzona przy użyciu Modelowania Wieloobektowego z widocznymi dodatkowymi operacjami logicznymi (*Add.17*, *Add.20*, *Trim.10*, *Add.11*, *Trim.9*, *Add.15*, *Add.12*, *Add.16*, *Add.13*, *Add.18*, *Add.14*, *Add.19*), dodatkowymi bryłami (objektami) głównymi (*Bryła Główna*, *Trzpień Pozycjonujący*) oraz zagnieżdżonymi bryłami (objektami) pomocniczymi (*baza*, *podstawa trzpienia*, *części składowe*, *rdzeń trzpienia*, *Body.26*, *żebra trzpienia*, *Body.23*, *Body.29*, *Body.24*, *Body.30*)

Ponownie zatem rozpoczęcie tworzenia topologii polegało na wygenerowaniu „pustego” obiektu o nazwie *Topologia Bryłowa*, a następnie poprzez operacje logiczne *Add* i *Trim*, dodawaniu do niego kolejnych obiektów, z których pierwszy, będący jednocześnie obiektem głównym, był *Bryłą Główną*. *Bryłę Główną* podzielono na zagnieżdżony w niej obiekt *baza* zawierający większość jej operacji oraz na operację przycięcia geometrii (*Split.3*) powstałej w obiekcie *baza*. Tworząc taką strukturę konstruktor przewiduje potencjalne jej zmiany i niejako uniezależnia jedną część tej struktury od drugiej. Nie znaczy to jednak, że operacja przycięcia *Split.3* nie miała powiązania z geometrią znajdującą się w obiekcie *baza*. Wspomniane uniezależnienie odnosi się tylko do samej topologii bryłowej opisywanego komponentu. Tak więc obiekt *Bryła Główna* został utworzony z dwóch operacji (rys. Z39):

- 1) *Add.20* – operacja logiczna dodawania obiektu *baza*,
- 2) *Split.3* – przycięcie bocznych ścian bryły bazowej na wymaganą wysokość.

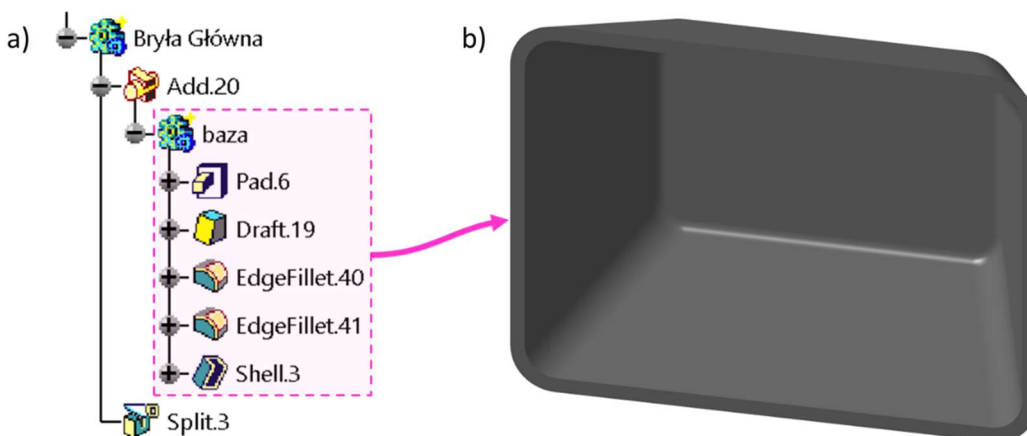


Rys. Z39. Komponent Cienkościenny: a) złożona topologia bryłowa, b) pierwszy obiekt główny (Bryła Główna) Komponentu Cienkościennego

Zagnieżdżony obiekt *baza* zawierał geometrię tworzącą *Komponent Cienkościenny* przed jego przycięciem i składał się z następujących operacji (rys. Z40):

- 1) *Pad.6* – bryła bazowa,
- 2) *Draft.19*, *EdgeFillet.40*, *EdgeFillet.41* – cechy technologiczne *Bryły Głównej*: pochylenie ścian, zaokrąglenia,
- 3) *Shell.3* – nadanie bryle bazowej wymaganej cienkościenności.

Należy jednocześnie zauważyć, że topologia obiektu *baza* miała charakter liniowy, bo nie zawierała w sobie żadnych dodatkowych obiektów pomocniczych. W związku z tym można w tym miejscu stwierdzić, że drzewo struktury modelu 3D utworzone przy użyciu techniki Modelowania Wieloobektowego może zawierać strukturę równoległą, liniową bądź złożoną. Struktura złożona występuje w sytuacji, gdy dany obiekt posiada obiekty pomocnicze i pojedyncze operacje modelowania, a jej najprostsza forma składa się z jednej operacji logicznej i jednej operacji modelowania. Obiekt *Bryła Główna* jest przykładem takiej struktury (rys. Z39a).

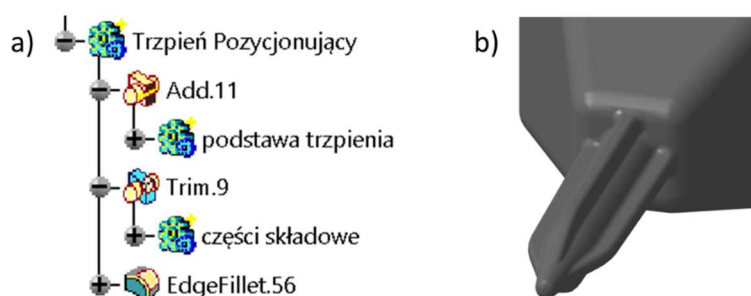


Rys. Z40. Komponent Cienkościenny: a) liniowa topologia bryłowa, b) zagnieżdżony obiekt *baza* *Bryły Głównej* Komponentu Cienkościennego

Drugim obiektem głównym *Komponentu Cienkościennego* był rozpatrywany *Trzpień Pozycjonujący*. O ile w kontekście całej topologii bryłowej *Komponentu Cienkościennego* można przyjąć, że posiadała ona dwa główne obiekty (*Bryła Główna* i *Trzpień Pozycjonujący*) oraz kilka obiektów pomocniczych, tak z uwagi na rozrastającą się strukturę *Trzpienia Pozycjonującego* zasadnym była zmiana kontekstu i rozpoczęcie rozpatrywania tego obiektu jako osobną topologię posiadającą dwa główne obiekty: *podstawa trzpienia* i *części składowe* oraz zawarte w nich obiekty pomocnicze (rys. Z38). Zatem podobnie jak w przypadku topologii powierzchniowej,

wielokrotne zagnieżdżanie obiektów równoległej topologii bryłowej modelu 3D pozwala rozpatrywać jej kolejne części składowe w kontekście lokalnych i niezależnych topologii posiadających własne obiekty główne i pomocnicze, a tym samym zwiększać jej czytelność i przejrzystość – nawet jeśli w konsekwencji jest ona dłuższa i szersza od standardowej topologii liniowej przedstawionej na rysunku Z31. Obiekt *Trzpień Pozycjonujący* składał się z dwóch operacji logicznych, z których jedna (*Trim.9*) umożliwiała, oprócz dodawania, realizowanie funkcji przycinania zbędnych części łączonych brył oraz z operacji zaokrąglenia (rys. Z41):

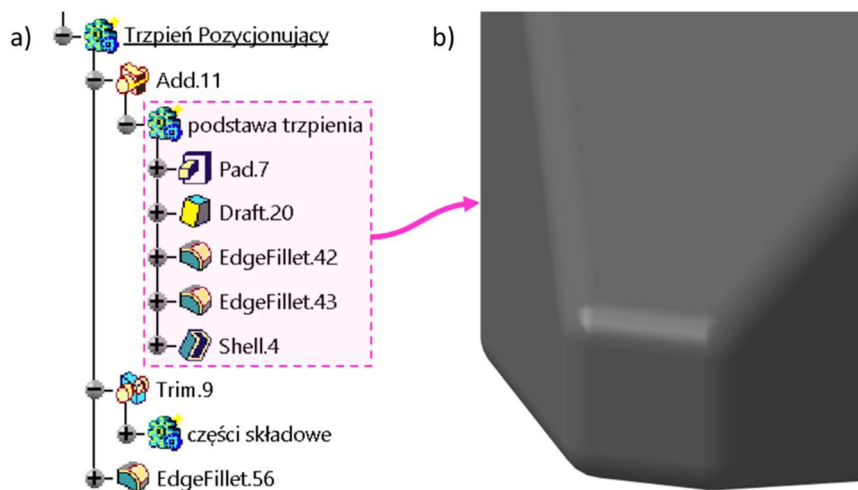
- 1) *Add.11* – operacja logiczna dodawania obiektu *podstawa trzpienia*,
- 2) *Trim.9* – operacja logiczna dodawania i przycinania obiektu *części składowe*,
- 3) *EdgeFillet.56* – operacja zaokrąglenia ostrej krawędzi powstałej w wyniku przecięcia się obiektów *podstawa trzpienia* i *części składowe*.



Rys. Z41. Komponent Cienkościenny: a) złożona topologia bryłowa, b) drugi obiekt główny (*Trzpień Pozycjonujący*) Komponentu Cienkościennego

Obiekt *podstawa trzpienia*, będąca jak sama nazwa wskazuje podstawą *Trzpienia Pozycjonującego*, składała się z następujących operacji (rys. Z42):

- 1) *Pad.7* – bryła bazowa,
- 2) *Draft.20*, *EdgeFillet.42*, *EdgeFillet.43* – cechy technologiczne *podstawy trzpienia*: pochylenie ścian, zaokrąglenia,
- 3) *Shell.4* – nadanie bryle bazowej wymaganej cienkościenności.



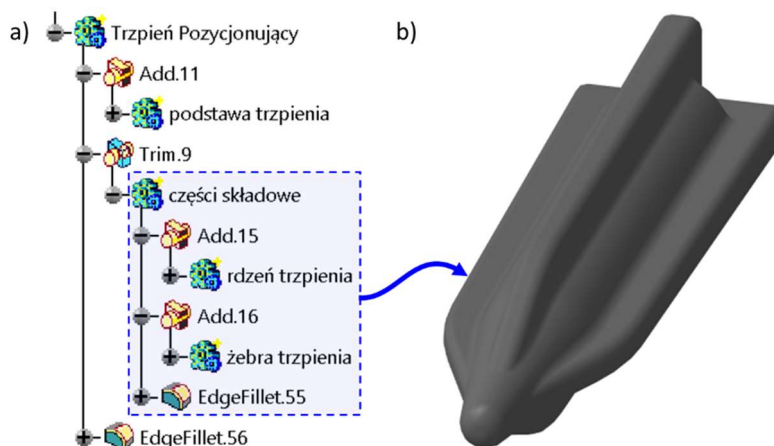
Rys. Z42. Komponent Cienkościenny: a) liniowa topologia bryłowa, b) pierwszy obiekt główny (*podstawa trzpienia*) *Trzpienia Pozycjonującego*

Podobnie jak w przypadku *Komponentu Cienkościennego* i *Trzpienia Pozycjonującego*, obiekt *części składowe*, będący obiektem głównym *Trzpienia Pozycjonującego* i jednocześnie obiektem pomocniczym *Komponentu Cienkościennego*, można było uznać za lokalną topologię bryłową



posiadającą dwa obiekty główne: *rdzeń trzpienia* i *żebra trzpienia* oraz ich zaokrąglenie w postaci operacji *EdgeFillet.55* (rys. Z43):

- 1) *Add.15* – operacja logiczna dodawania obiektu *rdzeń trzpienia*,
- 2) *Add.16* – operacja logiczna dodawania obiektu *żebra trzpienia*,
- 3) *EdgeFillet.55* – operacja zaokrąglenia ostrej krawędzi powstałej w wyniku przecięcia się obiektów *rdzeń trzpienia* i *żebra trzpienia*.



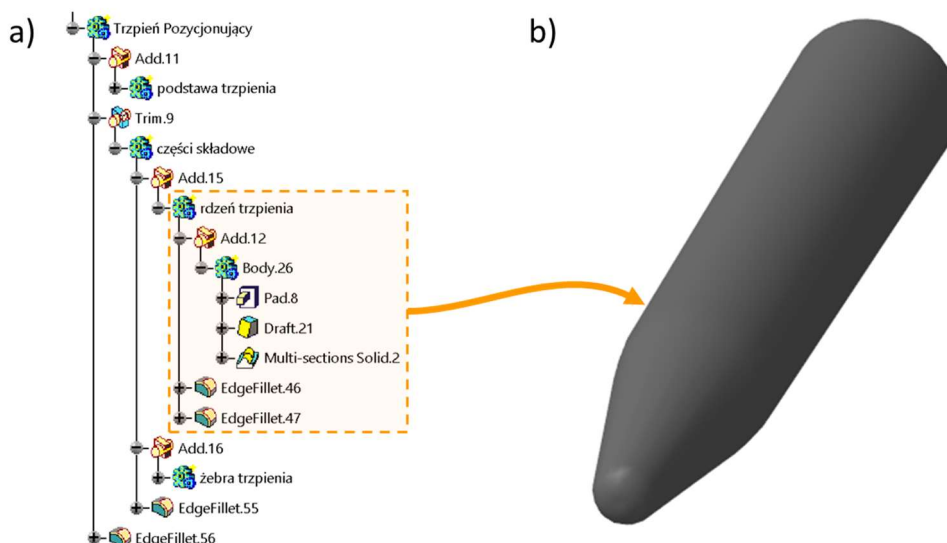
Rys. Z43. Komponent Cienkościenny: a) złożona topologia bryłowa, b) drugi obiekt główny (części składowe) Trzpienia Pozycjonującego

Pierwszym obiektem wchodzącym w skład części składowych Trzpienia Pozycjonującego stał się *rdzeń trzpienia* posiadający topologię złożoną składającą się z pomocniczego obiektu (*Body.26*) i dwóch zaokrągleń (*EdgeFillet.46*, *EdgeFillet.47*) ostrych krawędzi tego rdzenia (rys. Z44):

- 1) *Add.12* – operacja logiczna dodawania obiektu *Body.26*,
- 2) *EdgeFillet.46*, *EdgeFillet.47* – cechy technologiczne rdzenia trzpienia: zaokrąglenia ostrych krawędzi.

Natomiast obiekt pomocniczy *Body.26* składał się z operacji:

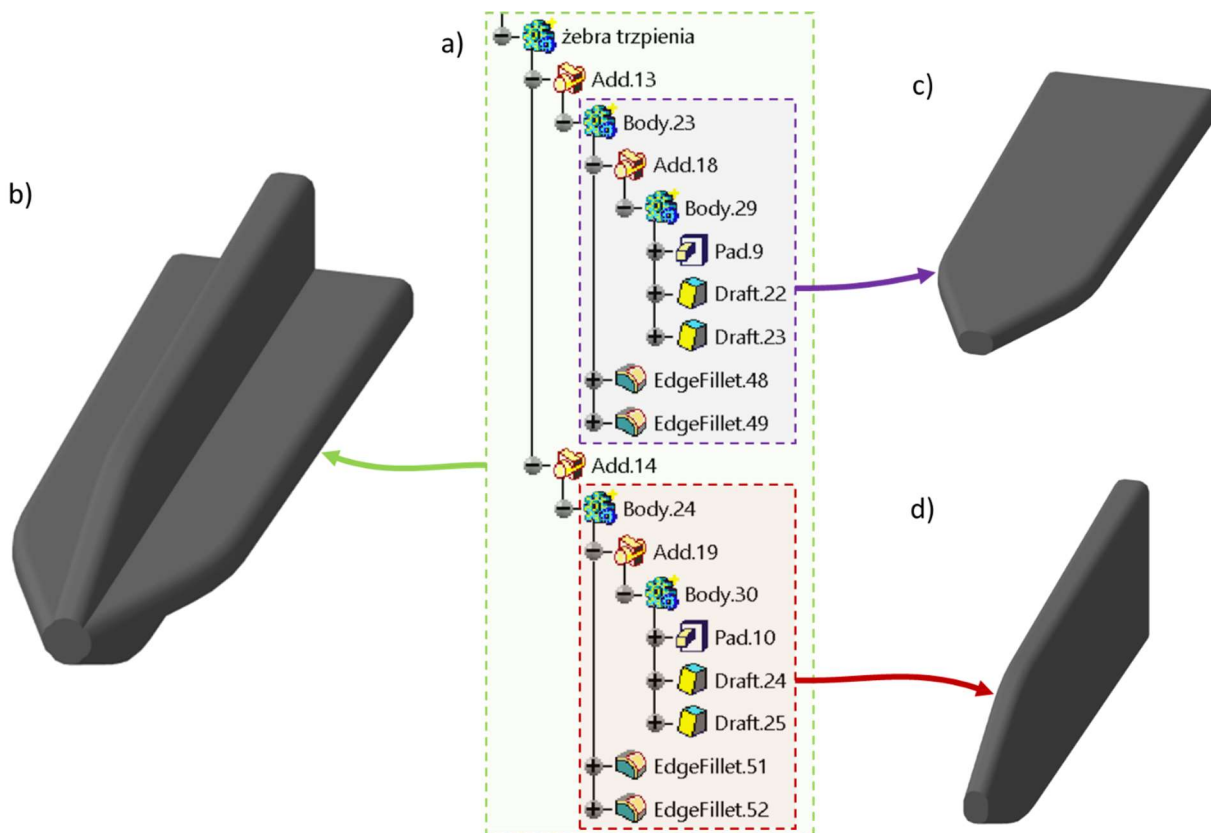
- 1) *Pad.8*, *Multi-sections Solid.2* – bryła bazowa,
- 2) *Draft.21* – cecha technologiczna rdzenia trzpienia: pochylenie cylindrycznej ściany.



Rys. Z44. Komponent Cienkościenny: a) złożona topologia bryłowa, b) pierwszy obiekt główny (rdzeń trzpienia) części składowych

Drugim obiektem wchodzącym w skład części składowych Trzpienia Pozycjonującego stał się obiekt *żebra trzpienia* posiadający topologię równoległą składającą się z dwóch pomocniczych obiektów (*Body.23*, *Body.24*). Topologie obiektów pomocniczych zawierały operacje tworzące żebro poziome (*Body.23*) i żebro pionowe (*Body.24*). Obie topologie miały formę złożoną, a ich budowa opierała się o te same założenia jak w przypadku wcześniejszych topologii złożonych (rys. Z45). Poniższy wykaz operacji obejmuje wszystkie struktury lokalne tworzące obiekt *żebra trzpienia*:

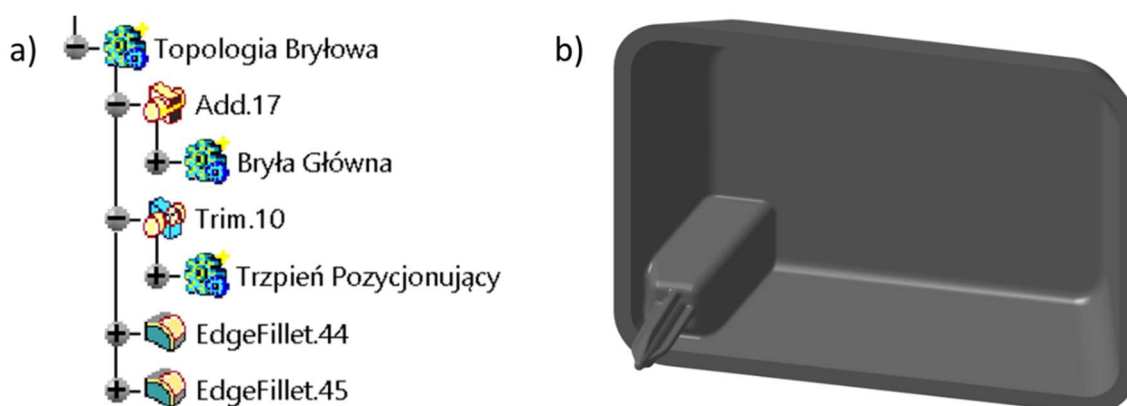
- obiekt *żebra trzpienia*:
  - 1) *Add.13* – operacja logiczna dodawania obiektu *Body.23*,
  - 2) *Add.14* – operacja logiczna dodawania obiektu *Body.24*,
- obiekt *Body.23*:
  - 1) *Add.18* – operacja logiczna dodawania obiektu *Body.29*,
  - 2) *EdgeFillet.48*, *EdgeFillet.49* – cechy technologiczne obiektu *Body.23*: zaokrąglenia ostrych krawędzi,
- obiekt *Body.24*:
  - 1) *Add.19* – operacja logiczna dodawania obiektu *Body.30*,
  - 2) *EdgeFillet.51*, *EdgeFillet.52* – cechy technologiczne obiektu *Body.24*: zaokrąglenia ostrych krawędzi,
- obiekty *Body.29*, *Body.30*:
  - 1) *Pad.9*, *Pad.10* – bryły bazowe,
  - 2) *Draft.22*, *Draft.23*, *Draft.24*, *Draft.25* – cechy technologiczne *żebier trzpienia*: pochylenia ścian.



Rys. Z45. Komponent Cienkościenny: a) równoległa topologia bryłowa, b) drugi obiekt główny (*żebra trzpienia*) części składowych, c) obiekt pomocniczy (*Body.23*) w postaci żebra poziomego, d) obiekt pomocniczy (*Body.24*) w postaci żebra pionowego

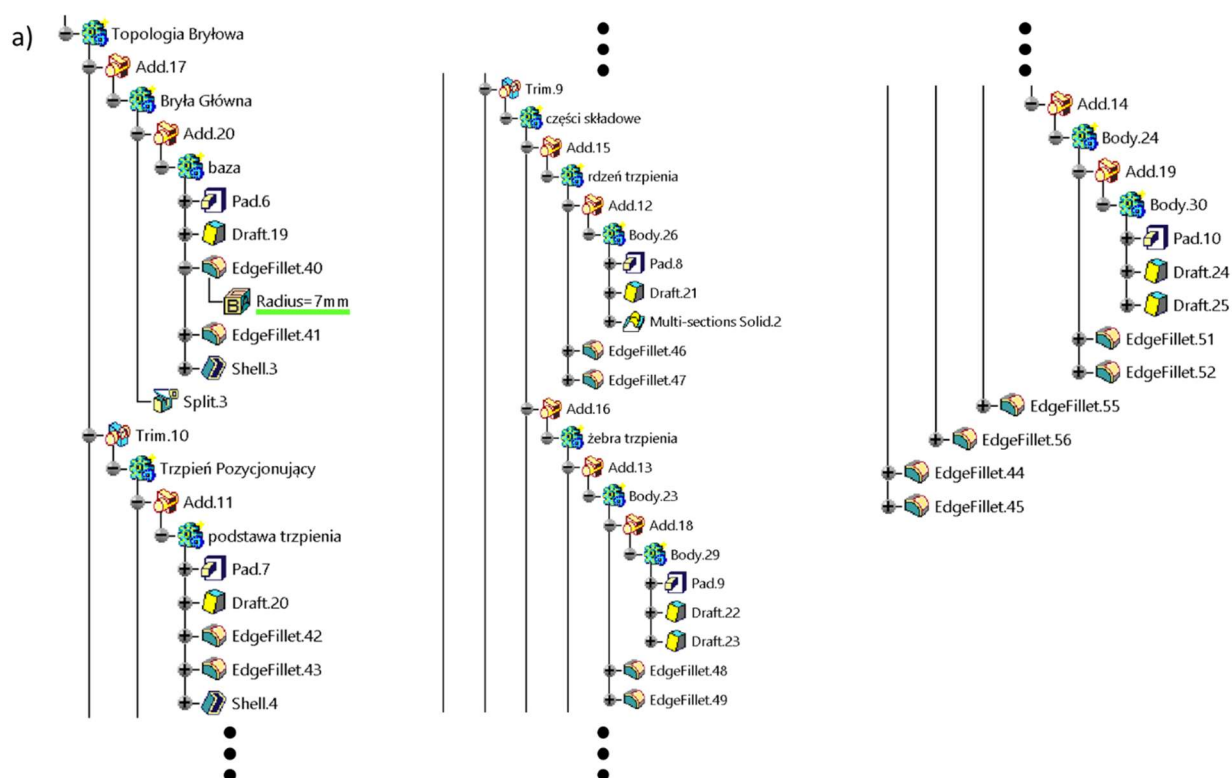
Ostatecznie *Komponent Cienkościenny* składał się z czterech operacji (rys. Z46):

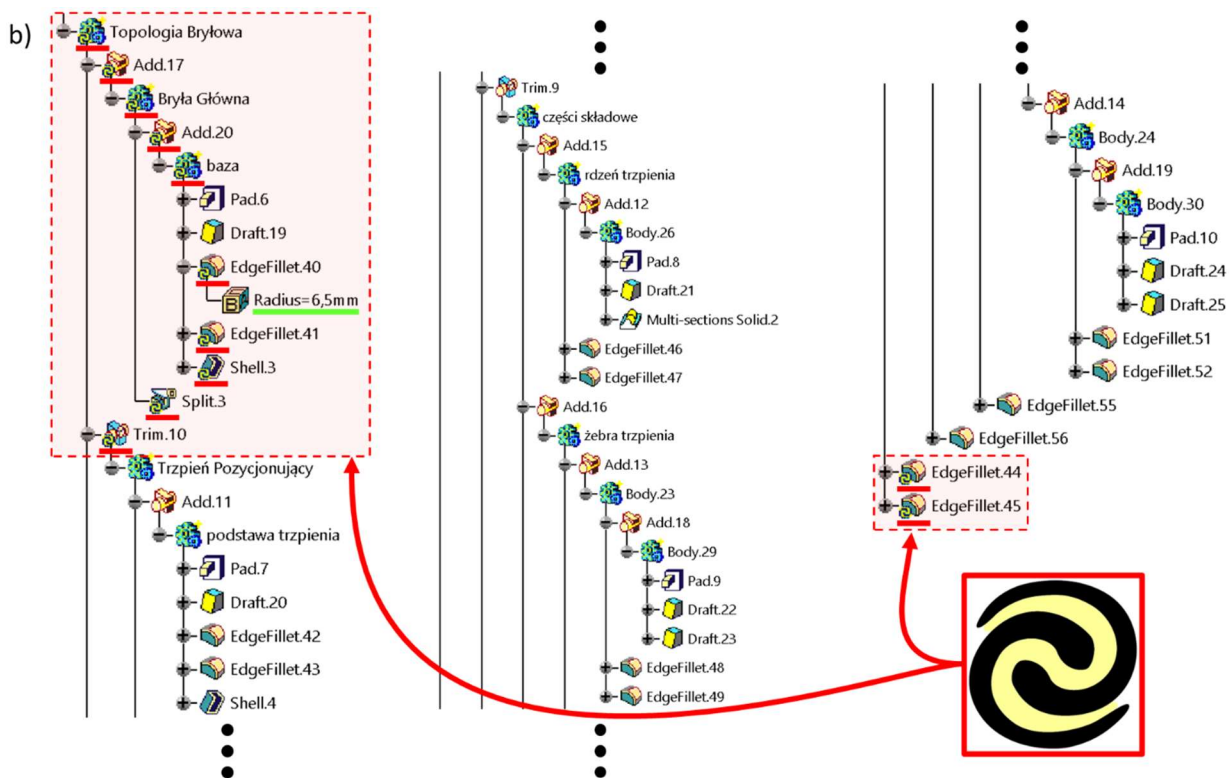
- 1) *Add.17* – operacja logiczna dodawania obiektu *Bryła Główna*,
- 2) *Trim.10* – operacja logiczna dodawania i przycinania obiektu *Trzpień Pozycjonujący*,
- 3) *EdgeFillet.44*, *EdgeFillet.45* – operacje zaokrąglenia ostrych krawędzi powstałych w wyniku przecięcia się obiektów *Bryła Główna* i *Trzpień Pozycjonujący*.



Rys. Z46. *Komponent Cienkościenny*: a) złożona topologia bryłowa, b) końcowy model 3D

Bryłowa topologia *Komponentu Cienkościennego* utworzona w oparciu o technikę Modelowania Wieloobektowego, mimo że bardziej rozbudowana niż standardowa topologia liniowa jest też od niej bardziej czytelna nie tylko dla jej twórcy, ale i przyszłych użytkowników, którzy będą ją modyfikowali. Zastosowanie lokalnych struktur w postaci obiektów głównych i pomocniczych pozwala na generowanie topologii w sposób równoległy uniezależniając jedną jej część od drugiej. Konstruktor wykorzystujący technikę Modelowania Wieloobektowego jest w stanie zapewnić tworzonej topologii „elastyczność” i stabilność podczas jej modyfikacji. Na rysunku Z47 pokazano w jaki sposób zmiana tego samego promienia co w przypadku opisanej wcześniej topologii liniowej wpływała na złożoną strukturę wieloobektową.



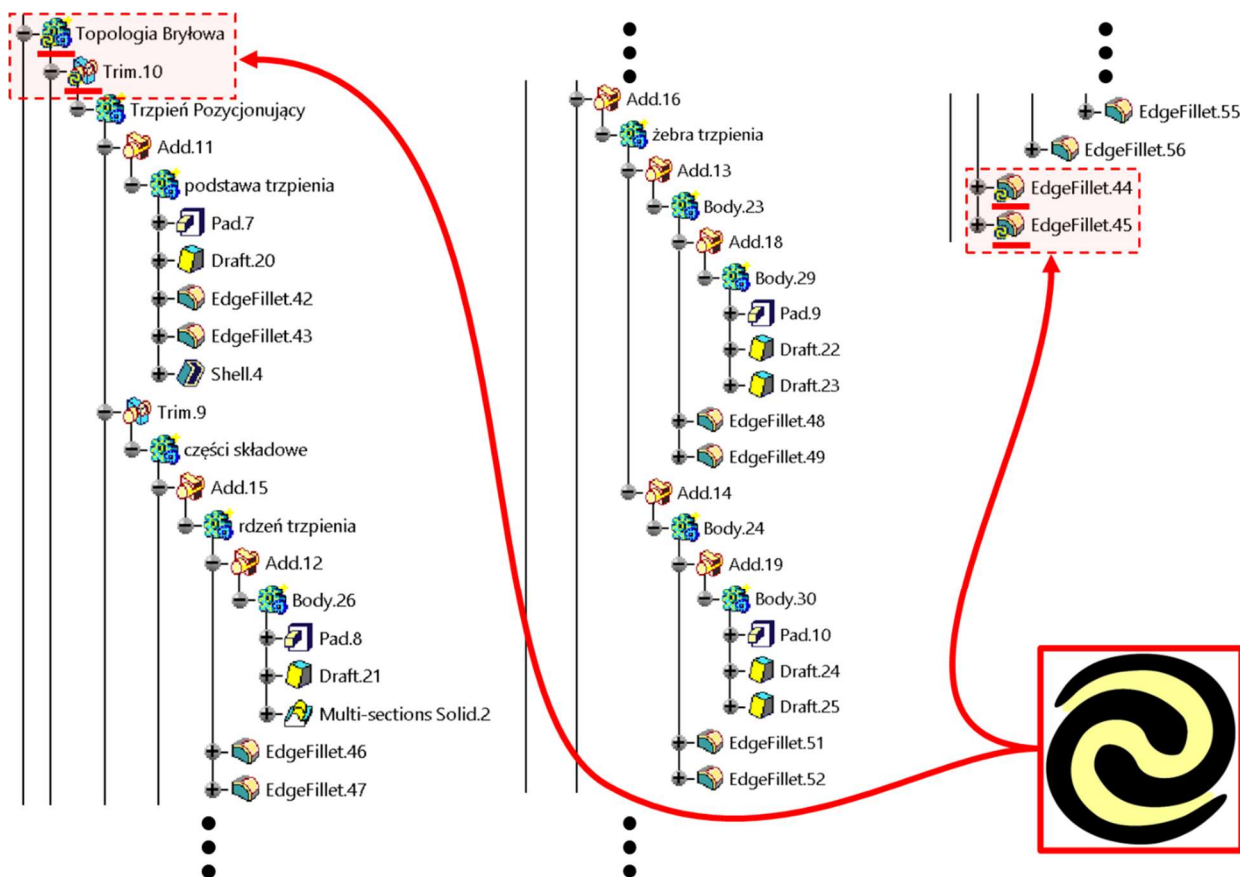


Rys. Z47. Modyfikacja promienia *EdgeFillet.40* złożonej topologii bryłowej *Komponentu Cienkościennego*, do utworzenia której wykorzystano technikę Modelowania Wieloobektowego: a) stan topologii przed modyfikacją promienia, b) stan topologii po modyfikacji promienia – ikona symbolizująca konieczność aktualizacji promienia *EdgeFillet.40* oraz tylko tych operacji, na które ta modyfikacja ma bezpośredni wpływ

Z rysunku Z47 wynika, że modyfikacja dowolnej operacji w złożonej topologii bryłowej nie naruszała jej ogólnej stabilności strukturalnej, natomiast wpływała tylko na te operacje, na które ta modyfikacja miała bezpośredni wpływ. W przedstawionym przykładzie modyfikacja wartości promienia *EdgeFillet.40* z 7 mm na 6,5 mm miała wpływ na pięć innych operacji geometrycznych (*EdgeFillet.41*, *Shell.3*, *Split.3*, *EdgeFillet.44*, *EdgeFillet.45*) oraz na trzy operacje logiczne (*Add.17*, *Add.20*, *Trim.10*). Pozostałe operacje topologii pozostawały stabilne, a więc nie wymagały dodatkowej uwagi ze strony autora i dodatkowego czasu na ich aktualizację. W podobny sposób ta sama złożona topologia bryłowa „zachowywała” się w przypadku, gdy jeden z jej obiektów został usunięty (rys. Z48). Mimo oczywistych następstw wynikających z usunięcia *Bryły Głównej*, czyli:

- brak możliwości połączenia drugiego obiektu głównego w postaci *Trzpienia Pozycjonującego* z nieistniejącym już w topologii obiektem *Bryły Głównej*,
- brak możliwości zaokrąglenia ostrych krawędzi wynikających z połączenia obu obiektów głównych,

to obiekt *Trzpień Pozycjonujący* nadal zachowywał stabilność strukturalną nie wykazując potrzeby aktualizacji.



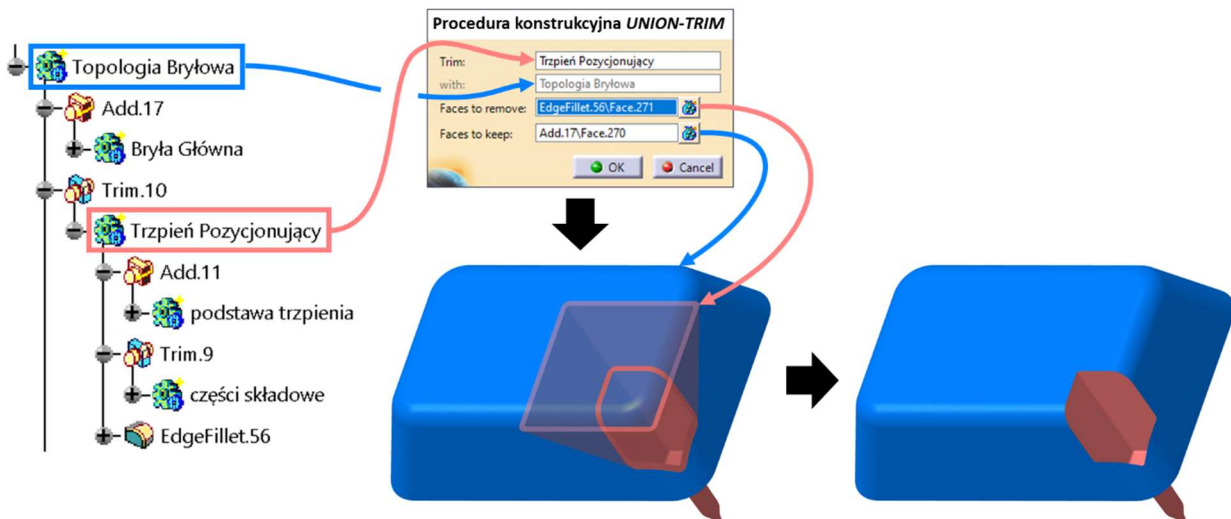
Rys. Z48. Modyfikacja złożonej topologii bryłowej *Komponentu Cienkościennego* w postaci usunięcia pierwszego jej obiektu głównego *Bryła Główna* – ikona symbolizująca konieczność aktualizacji operacji logicznej *Trim.10* oraz promieni *EdgeFillet.44* i *EdgeFillet.45*

Zatem większa czytelność nawet rozbudowanej równoległej topologii bryłowej, a także jej wysoka stabilność podczas wprowadzania istotnych zmian stanowią kluczową przewagę zastosowanej w niej techniki Modelowania Wieloobektowego nad standardową topologią bryłową zbudowaną w sposób liniowy – bez wykorzystania dodatkowych obiektów. Przedstawione w powyższych badaniach przykłady nie wyczerpują wszystkich zagadnień poruszanego tematu. Autor opisał tylko główne wytyczne tej techniki i konsekwencje jej implementacji w rozpatrywanym przykładzie *Komponentu Cienkościennego z Trzpieniem Pozycjonującym*. Poniżej zostały opisane w skrótovej formie trzy dodatkowe procedury konstrukcyjne umożliwiające łączenie obiektów w równoległej topologii modelu 3D, które mogą pomóc czytelnikowi pogłębić własną wiedzę w tym kierunku i zachęcić go do rozpoczęcia wykonywania prób odkrywania nowych zastosowań opisywanej techniki. Zatem istnieją przynajmniej trzy sposoby wykorzystania operacji logicznych we współczesnych systemach CAD:

- 1) Procedura konstrukcyjna *UNION-TRIM* – procedura konstrukcyjna zastosowana w opisaniej topologii *Komponentu Cienkościennego* w postaci operacji *Trim.10* i *Trim.9* pokazanej na rysunku Z38. Polega na wykorzystaniu operacji logicznej pozwalającej na jednoczesne dodawanie i przycinanie dwóch obiektów według wskazań użytkownika. Użytkownik ma możliwość:
  - wskazania rejonów obu obiektów do przycięcia – wówczas rejon niewskazane zostają połączone,

- wskazania rejonów obu obiektów do połączenia – wówczas rejon niewskazane zostają przycięte.

Granice wskazywanych rejonów wytyczają przecinające się objekty, dlatego użytkownik może wpływać na ich przebieg poprzez odpowiednie definiowanie geometrii poszczególnych obiektów. Na rysunku Z49 przedstawiono realizację procedury konstrukcyjnej *UNION-TRIM* na przykładzie operacji logicznej *Trim.10* w złożonej topologii *Komponentu Cienkościennego*.

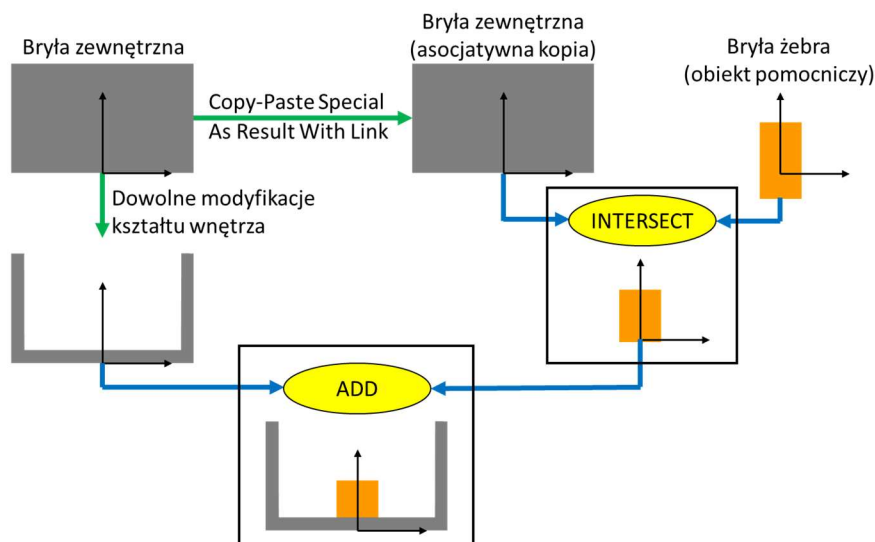


Rys. Z49. Procedura konstrukcyjna *UNION-TRIM* na przykładzie tworzenia operacji *Trim.10*, w której rejon *Trzpienia Pozycjonującego* wskazano do odcięcia, a rejon *Komponentu Cienkościennego* wskazano do połączenia

- 2) Procedura konstrukcyjna *INTERSECT-ADD* – polega na wykorzystaniu dwóch operacji logicznych:

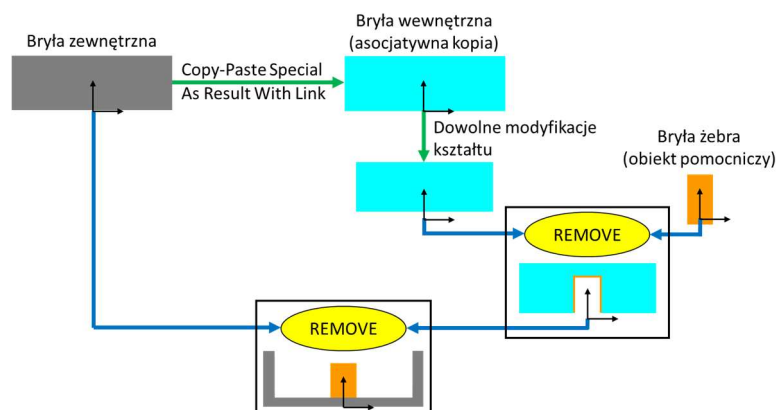
- *Intersect* – pozwalającej na uzyskanie części wspólnej łączonych obiektów,
- *Add* – pozwalającej na dodawanie dwóch obiektów.

W pierwszym etapie tworzona jest asocjatywna kopia obiektu głównego, który w tym przypadku pełni rolę bryłowego odpowiednika elementu podstawowego. Kopia ta jest następnie łączona z obiektem pomocniczym przy użyciu operacji logicznej *Intersect*, w efekcie czego uzyskiwana jest część wspólna obu obiektów. W drugim etapie uzyskana część wspólna dodawana jest do obiektu głównego za pomocą operacji logicznej *Add*, w którym mogą być wprowadzane, równoległe z etapem pierwszym, dodatkowe modyfikacje. Ważnym jest, aby asocjatywna kopia obiektu głównego pozbawiona była wszelkich modyfikacji, tak więc modyfikacje te są wykonywane po wykonaniu asocjatywnej kopii. Na rysunku Z50 przedstawiono w postaci schematycznej realizację procedury konstrukcyjnej *INTERSECT-ADD*.



Rys. Z50. Realizacja procedury konstrukcyjnej *INTERSECT-ADD* [65]

- 3) Procedura konstrukcyjna *REMOVE-REMOVE* – polega na dwukrotnym wykorzystaniu operacji logicznej pozwalającej na odejmowanie jednego obiektu od drugiego. Obiekt główny, ponownie pełniący rolę bryłowego odpowiednika elementu podstawowego, wykorzystany jest w postaci asocjatywnej kopii, do której wprowadzane są modyfikacje odzwierciedlające docelowy kształt tego obiektu. Następnie od zmodyfikowanej asocjatywnej kopii odejmowany jest obiekt pomocniczy, który docelowo ma być częścią obiektu głównego. W drugim etapie następuje ponowne wykorzystanie operacji logicznej, za pomocą której odejmowana jest zmodyfikowana asocjatywna kopia z logicznie połączonym obiektem pomocniczym od obiektu głównego, w efekcie czego następuje przeniesienie do tego obiektu modyfikacji asocjatywnej kopii oraz dodanie do niego obiektu pomocniczego. Zatem od asocjatywnej kopii bryły głównej odejmowany jest obiekt pomocniczy, a rezultat odejmowany jest od obiektu głównego. Obiekt pomocniczy jest w tej procedurze odejmowany dwa razy, czyli w rezultacie, zgodnie z zasadami logiki Boole’a, jest dodany do obiektu głównego. Na rysunku Z51 przedstawiono w postaci schematycznej realizację procedury konstrukcyjnej *REMOVE-REMOVE*.



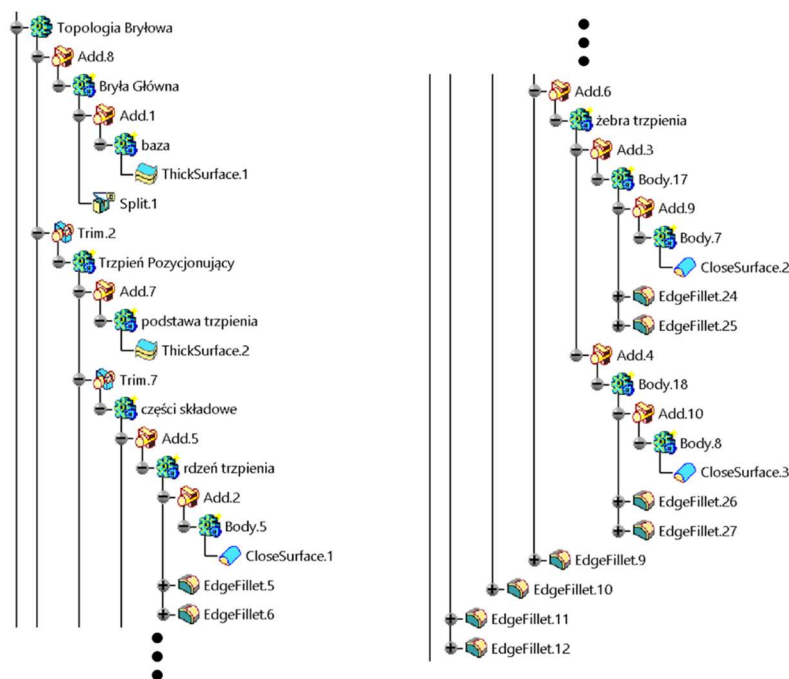
Rys. Z51. Realizacja procedury konstrukcyjnej *REMOVE-REMOVE* [65]

#### 4. Integracja powierzchniowej i bryłowej topologii modelu 3D

Ostatni etap badań nad zastosowaniem technik wchodzących w bezpośredni skład Modelowania Jednoznacznego do tworzenia topologii modeli CAD polegał na integracji opisanych w punkcie 2

i punkcie 3 niniejszego Załącznika topologii powierzchniowej i bryłowej modelu 3D. W tym celu autor dokonał optymalizacji jego topologii bryłowej poprzez implementację do niej między innymi trzech wcześniej przygotowanych geometrii powierzchniowych: podstawy, rdzenia i żeber *Trzpienia Pozycjonującego*. Przedmiotem optymalizacji była więc złożona topologia bryłowa *Trzpienia Pozycjonującego*, a co za tym idzie *Komponentu Cienkościennego*, przedstawiona na rysunku Z38 i wykonana przy użyciu techniki Modelowania Wieloobiektowego. Należy bowiem zaznaczyć, że poprzednio opisana złożona topologia bryłowa została przygotowana prawie w całości w oparciu o technikę Modelowania Bryłowego, podczas gdy końcowym celem autora była jej integracja z topologią powierzchniową, tak by w pełni zaimplementować do rozpatrywanego modelu 3D technikę Modelowania Hybrydowego. W konsekwencji rozkład strukturalny *Trzpienia Pozycjonującego*, a tym samym *Komponentu Cienkościennego*, został podzielony na topologię bryłową i powierzchniową, co zwiększyło przejrzystość drzewa struktury modelu 3D oraz podniosło jego stabilność podczas dokonywania zmian konstrukcyjnych. Aby czytelnik nie zagubił się w operowanej przez autora nomenklaturze dotyczącej technik modelowania warto przypomnieć, że tworzenie modeli 3D może odbywać się przy użyciu kilku technik jednocześnie. W rozważanym przykładzie podstawowymi technikami były Modelowanie w oparciu o Cechy Geometryczne jako uniwersalna technika systemu CAD, Modelowanie Powierzchniowe dla jego topologii powierzchniowej i Modelowanie Bryłowe dla jego topologii bryłowej. Wynikiem połączenia tych technik jest Modelowanie Hybrydowe. Natomiast opisywane w tym Załączniku Modelowanie Poziome i Wieloobiektowe wchodzi w skład technik podstawowych. Ich zastosowanie jest zalecane przez autora, bo stanowi ważny element procesu optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD.

Rysunek Z52 ilustruje bryłową topologię *Komponentu Cienkościennego* poddaną procesowi optymalizacji. Pierwsze co da się zauważyć, to podobieństwo do topologii z rysunku Z38 pod względem jej „rozciągnięcia” w poziomie wynikającej z jej lokalnego charakteru w postaci odrębnych, czyli zagnieżdżonych, obiektów głównych i pomocniczych tworzących tym samym strukturę równoległą, a ściślej – strukturę złożoną.



Rys. Z52. Złożona bryłowa topologia *Komponentu Cienkościennego* utworzona poprzez jej integrację z topologią powierzchniową

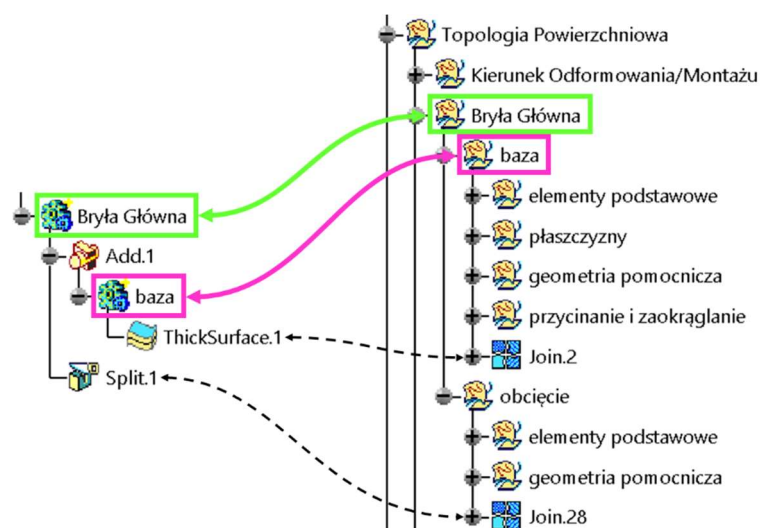


Jednocześnie widoczny jest mniejszy stopień skomplikowania w porównaniu do poprzedniej topologii będący następstwem zredukowania użytej ilości typów operacji ograniczający się do:

- operacji logicznych (*Add.8, Add.1, Trim.2, Add.7, Trim.7, Add.5, Add.2, Add.6, Add.3, Add.9, Add.4, Add.10*),
- operacji tworzących obiekty cienkościenne na podstawie danego płata powierzchni (*ThickSurface.1, ThickSurface.2*),
- operacji przycinającej (*Split.1*),
- operacji tworzących bryłę z zamkniętych płatów powierzchni (*CloseSurface.1, CloseSurface.2, CloseSurface.3*),
- operacji tworzących zaokrąglenia (*EdgeFillet.5, EdgeFillet.6, EdgeFillet.24, EdgeFillet.25, EdgeFillet.26, EdgeFillet.27, EdgeFillet.9, EdgeFillet.10, EdgeFillet.11, EdgeFillet.12*).

Autor dokonując integracji strukturalnej rozważanego modelu 3D niejako „przeniósł” nadmiar informacji z jednej formy jego struktury do drugiej, a tym samym zbalansował ich czytelność. Niemniej jednak idea tworzenia zintegrowanej topologii bryłowej jest podobna do poprzednio opisywanej topologii z rysunku Z38. Poniżej przedstawiono powiązania poszczególnych operacji topologii bryłowej z operacjami topologii powierzchniowej.

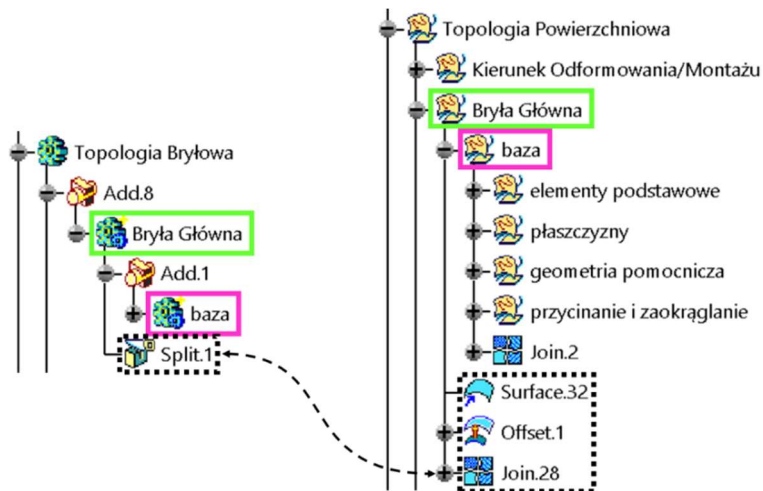
Obiekty mające swoje odzwierciedlenie w topologii powierzchniowej nazwano w taki sam sposób jak jej główne zestawy geometryczne. Ułatwiło to autorowi odnalezienie zbioru geometrycznego odpowiadającego za utworzenie danej części składowej bryłowego modelu 3D. *Komponent Cienkościenne* składał się ponownie z dwóch głównych obiektów: *Bryła Główna* i *Trzpień Pozycjonujący*. Powierzchniowym odpowiednikiem pierwszego z nich był zestaw geometryczny o takiej samej nazwie, czyli *Bryła Główna*, w którym „wyciągnięte” na wierzch operacje zbiorów *baza* (*Join.2*) i *obcięcie* (*Join.28*) w bezpośredni sposób odnosiły się do operacji topologii bryłowej – odpowiednio *ThickSurface.1* i *Split.1* (rys. Z53).



Rys. Z53. Zgodność nazw obiektów topologii bryłowej z zestawami geometrycznymi topologii powierzchniowej *Komponentu Cienkościenne*

O ile pomocniczy obiekt *baza* również posiadał swój odpowiednik w postaci tak samo nazwanego zestawu geometrycznego topologii powierzchniowej, o tyle pojedyncza operacja *Split.1* utworzona bezpośrednio w głównym obiekcie *Bryła Główna* odnosiła się do operacji powierzchniowej *Join.28* utworzonej w pomocniczym zestawie geometrycznym *obcięcie*. Zatem zaszła w tym przypadku rozbieżność strukturalna, która jednak została wprowadzona celowo, bo o ile operacja *Split.1* utworzona w obiekcie *Bryła Główna* nie powodowała spadku czytelności

strukturalnej, o tyle pozostawienie jej odpowiedniczki *Join.28* i wszystkich operacji ją tworzących bezpośrednio w zestawie geometrycznym *Bryła Główna* już tę czytelność mogłaby obniżyć (rys. Z54). Ponadto, tworzenie operacji bryłowych w formie osobnego obiektu, których funkcją jest modyfikacja innych obiektów topologii bryłowej, z logicznego, ale też z praktycznego punktu widzenia, jest w systemach CAD niemożliwa. Natomiast rozbieżność w nazwie między bezpośrednio powiązаныmi operacjami bryłowymi i powierzchniowymi wynika z wcześniej przedstawionych wniosków autora, według których zmiana automatycznie tworzonego przez system CAD nazewnictwa wydaje się być najbardziej racjonalna tylko dla niektórych obiektów topologii bryłowej oraz zestawów geometrycznych topologii powierzchniowej, by nie zaburzać czytelności strukturalnej na dalszych pracach z danym modelem 3D.



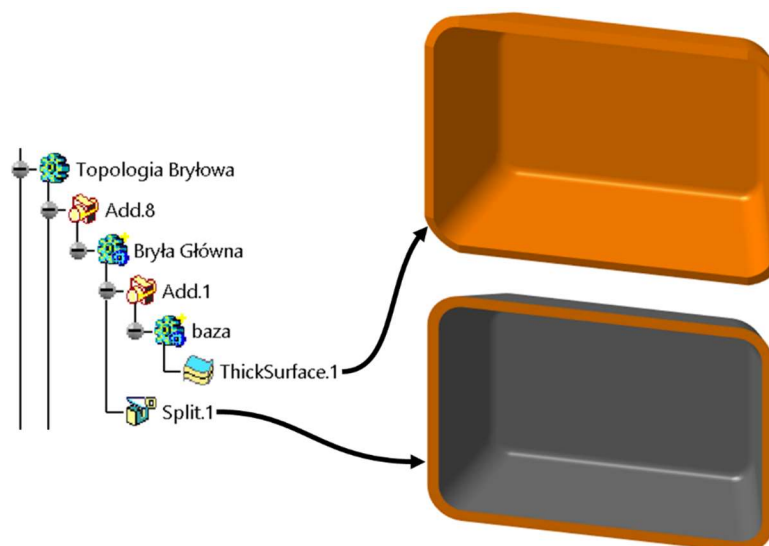
Rys. Z54. Obniżona czytelność topologii powierzchniowej wynikająca z braku zastosowania pomocniczego zestawu geometrycznego dla geometrii tworzącej bryłową operację *Split.1*

Z tego też powodu operacje bryłowe *ThickSurface.1* i *Split.1* nie zostały zunifikowane pod kątem nazw odpowiadających im operacji powierzchniowych *Join.2* i *Join.28*. Jednak pomimo braku spójności nazw operacji obu topologii autor był w stanie łatwo odnaleźć ważne z punktu widzenia ich integracji powiązania. W odnalezieniu odpowiednich zależności pomagała czytelna budowa tych topologii, jak również narzędzie programowe danego systemu CAD, dzięki któremu autor mógł wyświetlić te zależności w dodatkowym oknie programowym. W przypadku systemu CATIA V5 narzędzie to nazywa się *Parents and Children* będącym nawiązaniem do relacji rodziców i dzieci polegającej na „nadrzędności” rodzica w stosunku do dziecka i „podrzędności” dziecka w stosunku do rodzica. Na rysunku Z55 przedstawiono okno programowe narzędzia *Parents and Children*, w którym operacja w lewej jego części (*Join.28*) jest nadrzędna dla operacji w prawej jego części (*Split.1*). Zatem *Join.28* jest „rodzicem” „dziecka” *Split.1*.



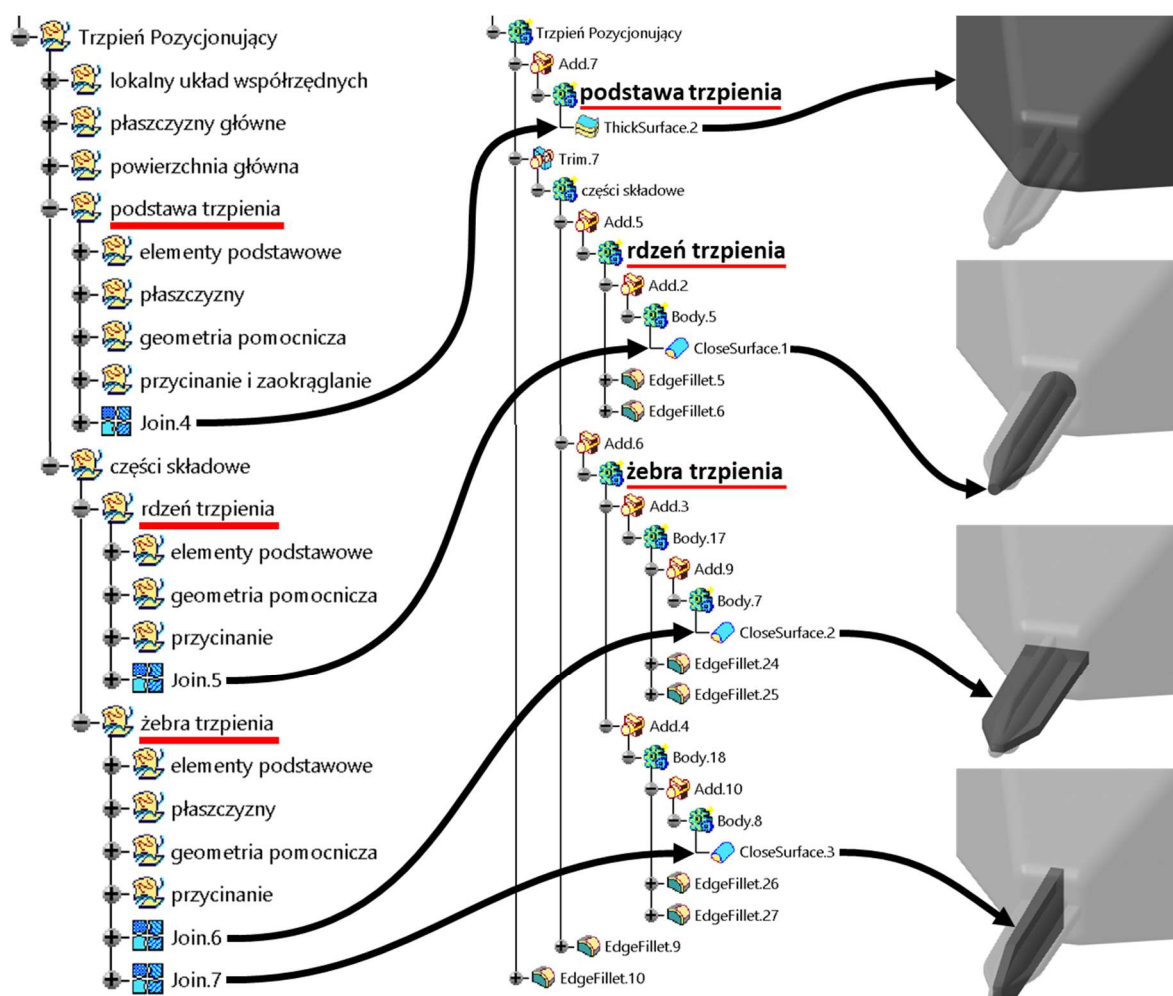
Rys. Z55. Okno programowe narzędzia systemu CATIA V5 – *Parents and Children*

Operacja bryłowa *ThickSurface.1* odpowiadała za utworzenie cienkościennej bryły bazowej, która z kolei została przycięta za pomocą operacji *Split.1* tworząc tym samym pierwszy obiekt główny w topologii *Komponentu Cienkościennego – Bryła Główna* (rys. Z56).



Rys. Z56. Pierwszy obiekt główny topologii bryłowej *Komponentu Cienkościennego* – *Bryła Główna*

Natomiast lokalna topologia *Trzpień Pozycjonującego*, w postaci drugiego głównego obiektu tej topologii, zawierała cztery operacje bryłowe bezpośrednio powiązane z operacjami powierzchniowymi (rys. Z57):



Rys. Z57. Cztery operacje bryłowe *Trzpienia Pozycjonującego*: *ThickSurface.2*, *CloseSurface.1*, *CloseSurface.2*, *CloseSurface.3* bezpośrednio powiązane z jego operacjami powierzchniowymi

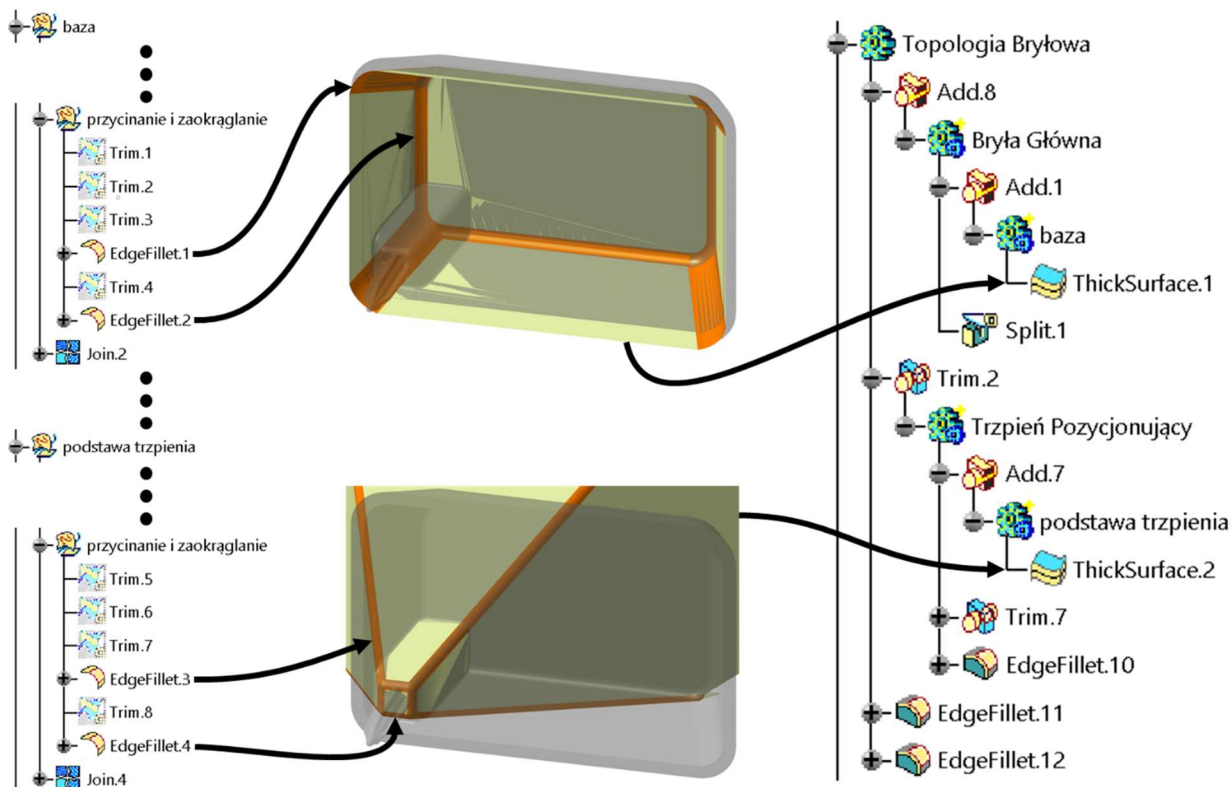
- 1) *ThickSurface.2* – operacja bryłowa tworząca obiekt cienkościenny *podstawa trzpienia* i powiązana z końcową operacją powierzchniową *Join.4* zestawu geometrycznego *podstawa trzpienia*.
- 2) *CloseSurface.1* – operacja bryłowa tworząca obiekt *rdzeń trzpienia*, dodatkowo zagnieżdżona w nim jako obiekt *Body.5* i powiązana z końcową operacją powierzchniową *Join.5* zestawu geometrycznego *rdzeń trzpienia*.

Dodatkowymi operacjami bryłowymi obiektu *rdzeń trzpienia* były zaokrąglenia ostrych krawędzi *EdgeFillet.5* i *EdgeFillet.6*, które nie zostały zaimplementowane na etapie tworzenia topologii powierzchniowej, a dopiero na etapie tworzenia topologii bryłowej (rys. Z58).



Rys. Z58. Zaokrąglenia ostrych krawędzi *EdgeFillet.5* i *EdgeFillet.6* obiektu *rdzeń trzpienia*

Balans między obiema topologiami nie wynika bowiem z „równego obdzielania” ich poszczególnymi operacjami, a z uzasadnionego nadawania danej geometrii formy powierzchniowej lub bryłowej. Tak więc pomijając proste pod względem kształtu komponenty generowane tylko przy użyciu Modelowania Bryłowego, geometria powierzchniowa stanowi stabilny i przewidywalny fundament dla bryłowych rejonów modelu 3D. Wykorzystując podstawowe prymitywy w postaci punktów, linii, płaszczyzn i układów współrzędnych, a także odpowiednie techniki modelowania, w tym technikę Modelowania Jednoznacznego, użytkownik ma możliwość utworzenia kontrolowanej i jednoznacznej geometrii powierzchniowej, a w konsekwencji geometrii bryłowej, niezależnie od stopnia skomplikowania postaciowego danego komponentu. Technologiczne zaokrąglenia ostrych krawędzi warto dodawać dopiero na etapie modelowania bryłowego, bo najczęściej nie stanowią one stabilnej podstawy, na której mogłyby być generowane kolejne operacje powierzchniowe. Dodatkowo zaokrąglenia takie łatwiej jest z modelu 3D usunąć lub deaktywować na przykład w momencie przygotowywania jego wersji do obliczeń inżynierskich z użyciem systemów klasy CAE. Z drugiej strony przy tworzeniu topologii powierzchniowej nie wszystkie zaokrąglenia należy pomijać. W sytuacji, gdy przygotowywana powierzchnia ma posłużyć do utworzenia cienkościennej bryły, to wszelkie jej ostre krawędzie warto zaokrąglić, by nadawana na etapie bryłowym grubość z tego powodu już takowe również posiadała i by użytkownik nie musiał obliczać ich wartości i dodawać ich „ręcznie”. Dlatego też w rozważanym przypadku operacje bryłowe generujące bryły cienkościenne (*ThickSurface.1*, *ThickSurface.2*) nie wymagały dodatkowych zaokrągleń, bo zostały one dodane już na etapie powierzchniowym (rys. Z59).

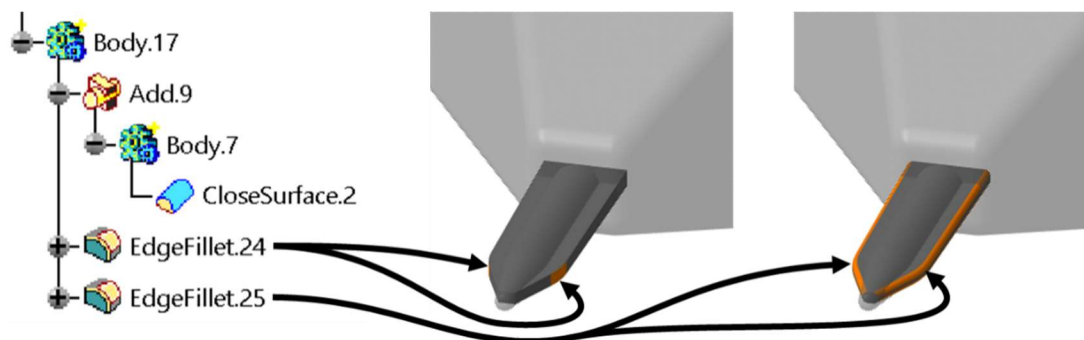


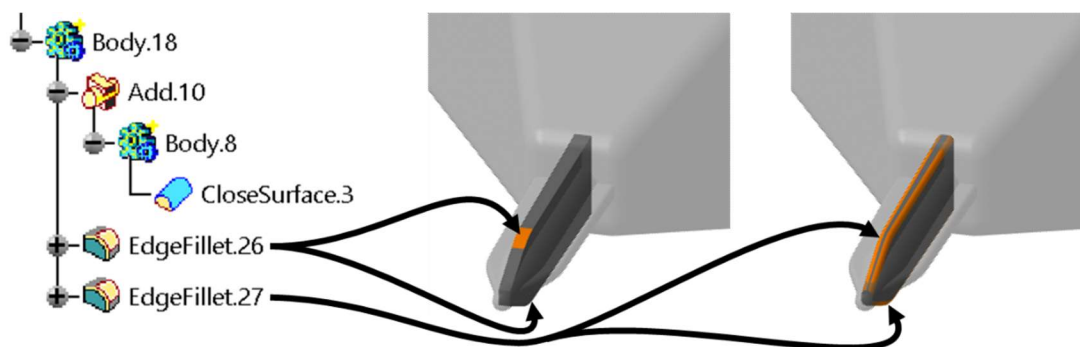
Rys. Z59. Zaokrąglenia ostrych krawędzi powierzchni *baza* *Join.2* i *podstawa trzpienia* *Join.4* *Komponentu Cienkościnnego*

Takie działanie pozwala uniknąć pomyłek wynikających z nadania niepoprawnej grubości na zagięciach obiektów cienkościennych. Jednak w przypadku pozostałych obiektów – nieposiadających nominalnej grubości ścian – lepszym rozwiązaniem wydaje się dodawanie zaokrągleń dopiero na etapie tworzenia topologii bryłowej.

- 3) *CloseSurface.2* – operacja bryłowa tworząca obiekt *żebra trzpienia* i powiązana z końcową operacją powierzchniową *Join.6* zestawu geometrycznego *żebra trzpienia*.
- 4) *CloseSurface.3* – operacja bryłowa tworząca obiekt *żebra trzpienia* i powiązana z końcową operacją powierzchniową *Join.7* zestawu geometrycznego *żebra trzpienia*.

W przypadku operacji *CloseSurface.2* i *CloseSurface.3* można zaobserwować ich podwójne zagnieżdżenie w obiekcie *żebra trzpienia*. Pierwszy poziom zagnieżdżenia (*Body.7* dla *CloseSurface.2* i *Body.8* dla *CloseSurface.3*) wynikał z chęci odseparowania operacji bryłowych bezpośrednio powiązanych z operacjami powierzchniowymi od dodatkowych zaokrągleń (*EdgeFillet.24*, *EdgeFillet.25* dla *Body.17* i *EdgeFillet.26*, *EdgeFillet.27* dla *Body.18* – rys. Z60), tak by w razie konieczności ułatwić ich podmianę na dalszych etapach prac z modelem 3D.



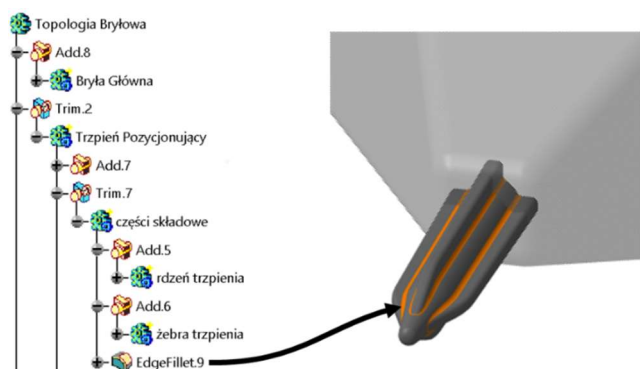


Rys. Z60. Pierwszy poziom zagnieżdżenia operacji *CloseSurface.2* i *CloseSurface.3* zaimplementowany w celu odseparowania ich od dodatkowych operacji zaokrąglania ostrych krawędzi *EdgeFillet.24*, *EdgeFillet.25*, *EdgeFillet.26* i *EdgeFillet.27*

Z tego samego powodu zastosowano zagnieżdżenie w postaci obiektu *Body.5* wcześniej opisanej operacji bryłowej *CloseSurface.1*. Drugi poziom zagnieżdżenia (*Body.17* i *Body.18*) wynikał z chęci odseparowania od siebie poszczególnych żeber trzpienia – poziomego (*Body.17*) od pionowego (*Body.18*). Takie odseparowanie miało z kolei ułatwić usunięcie jednego z żeber w razie, gdy na dalszych pracach z modelem 3D któreś z nich będzie zbędne.

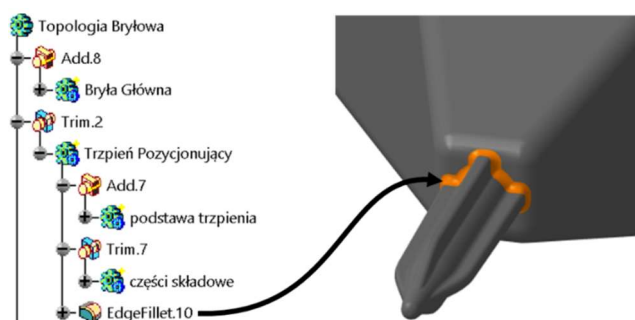
Bryłowa topologia *Komponentu Cienkościennego* została zakończona czterema zaokrągleniami:

- 1) *EdgeFillet.9* – zaokrąglenie krawędzi powstałej w wyniku połączenia obiektów *rdzeń trzpienia* i *żebra trzpienia* (rys. Z61),



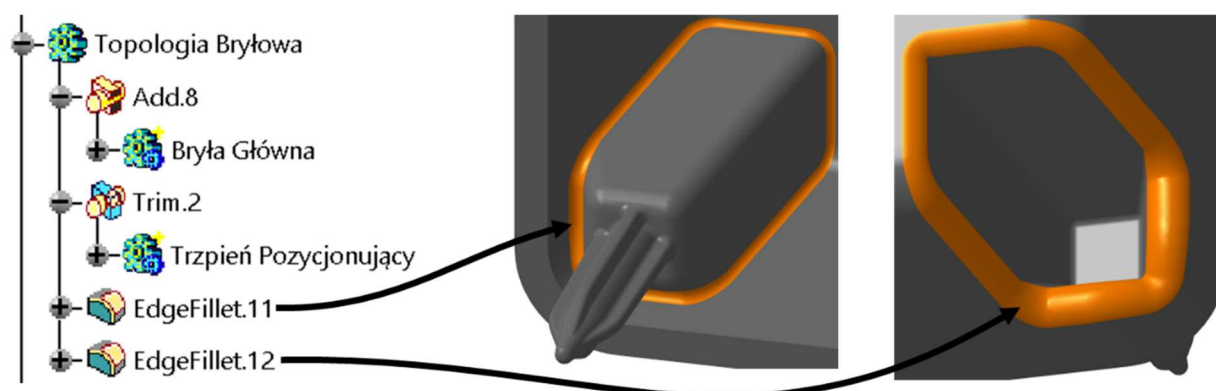
Rys. Z61. Zaokrąglenie krawędzi *EdgeFillet.9* powstałej w wyniku połączenia obiektów *rdzeń trzpienia* i *żebra trzpienia*

- 2) *EdgeFillet.10* – zaokrąglenie krawędzi powstałej w wyniku połączenia obiektów *podstawa trzpienia* i *części składowe* (rys. Z62),



Rys. Z62. Zaokrąglenie krawędzi *EdgeFillet.10* powstałej w wyniku połączenia obiektów *podstawa trzpienia* i *części składowe*

- 3) *EdgeFillet.11* – zaokrąglenie wewnętrznej krawędzi powstałej w wyniku połączenia obiektów *Bryła Główna* i *Trzpień Pozycjonujący* (rys. Z63),
- 4) *EdgeFillet.12* – zaokrąglenie zewnętrznej krawędzi powstałej w wyniku połączenia obiektów *Bryła Główna* i *Trzpień Pozycjonujący* (rys. Z63).



Rys. Z63. Zaokrąglenie wewnętrznej i zewnętrznej krawędzi *EdgeFillet.11* i *EdgeFillet.12* powstałych w wyniku połączenia obiektów *Bryła Główna* i *Trzpień Pozycjonujący*

Opisana równoległa bryłowa topologia *Komponentu Cienkościennego* została zintegrowana z jego topologią powierzchniową, co oznaczało, że technika Modelowania Hybrydowego została w pełni zaimplementowana. Nie oznaczało to natomiast, że autor odnosił każdą operację modelowania bryłowego bezpośrednio do poszczególnych operacji modelowania powierzchniowego. Wspomniane w punkcie 3.3.2 Rozdziału 3 niniejszej pracy zachowanie „złotego środka” ma zastosowanie zarówno w topologii powierzchniowej modelu 3D, jak i w jego bryłowej odpowiedniczce. Dlatego formowanie kolejnych gałęzi i liści drzewa struktury *Komponentu Cienkościennego* należało przeprowadzać w taki sposób, aby stanowiły one harmonijny i spójny układ. Dzięki temu kolejne jego operacje wynikały jedna z drugiej tworząc jednocześnie logiczną całość.

Podsumowując, do przygotowania topologii *Komponentu Cienkościennego* wykorzystano następujące techniki modelowania:

- Modelowanie w oparciu o Cechy Geometryczne – technika Modelowania Powierzchniowego i Bryłowego, w której użytkownik definiuje geometrię korzystając z intuicyjnych narzędzi programowych w postaci okien edycyjnych zawierających jej charakterystyczne atrybuty,
- Modelowanie Poziome – technika Modelowania Powierzchniowego i Bryłowego umożliwiającą utworzenie sieci powiązań między operacjami w obrębie topologii powierzchniowej, bryłowej, jak i między tymi topologiami w taki sposób, aby tworzyła ona spójną i logiczną całość,
- Modelowanie Wieloobektowe – technika Modelowania Bryłowego bazująca na łączeniu części składowych modelu w formie obiektów przy użyciu operacji Boole’owskich, która umożliwia tym samym definiowanie równoległej topologii modelu 3D zastępując jej pionową formę,
- Modelowanie Hybrydowe – technika Modelowania Powierzchniowego i Bryłowego, w której model 3D zbudowany jest w oparciu o operacje Modelowania Bryłowego, jak i Powierzchniowego.

Warto w tym miejscu dodać, że zaproponowane procedury konstrukcyjne nie są jedynymi możliwościami i tak jak wspomniano na początku tego Załącznika – wynikają z inwencji konstruktora, a także z przyjętych przez niego kryteriów wyboru. Z drugiej strony, zdaniem autora,

nie należy rozpatrywać owych możliwości w ujęciu wielorakim. Wbrew powszechnej opinii zawartej w dostępnej literaturze na temat „wielorodności sposobów tworzenia tego samego modelu 3D” autor zaleca by wielorodność tę rozpatrywać w kontekście maksymalnie kilku sposobów, bo zgodnie z jego doświadczeniem mnogość możliwości jakie oferują systemy CAD w kwestii tworzenia modeli 3D nie jest równoznaczna z mnogością rozwiązań spełniających przyjęte przez konstruktora kryteria wyboru. Przedstawiając powyższe procedury konstrukcyjne autor jednocześnie zdawał sobie sprawę, że podobne rezultaty można osiągnąć poprzez zastosowanie zewnętrznych parametrów systemu CAD, które mogą być powiązane z wybranymi częściami składowymi danego modelu 3D. Chciał on jednak w niniejszej pracy skupić się na fundamentalnych zasadach tworzenia geometrii i zwrócić tym samym uwagę na korzyści płynące z optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD. Jeśli bowiem użytkownik jest w stanie osiągnąć podobne rezultaty samymi parametrami zewnętrznymi, nie zwracając zbytnio uwagi na topologię geometryczną, to ich integracja z poruszonymi w niniejszej pracy zagadnieniami pozwoli mu, a tym samym środowisku inżynierskiemu, jeszcze bardziej przesunąć granicę w kierunku tworzenia autogenerujących modeli 3D [44].

Model 3D opisanego *Komponentu Cienkościennego* miał prostą geometrycznie formę i zaznajomiony z poruszaną w tej pracy tematyką czytelnik z pewnością zadał sobie pytanie: *Dlaczego autor proponuje tak skomplikowaną metodykę wykorzystującą połączenie topologii powierzchniowej i bryłowej, a więc Modelowanie Hybrydowe, do tak nieskomplikowanego geometrycznie modelu 3D, który z powodzeniem mógłby być zrealizowany przy użyciu techniki Modelowania Bryłowego zawierającej jednocześnie wytyczne Modelowania Poziomego i Wieloobiektowego?*

Autor w ten sposób wskazał rekomendowane przez niego techniki wchodzące bezpośrednio w skład jego autorskiej metodyki Modelowania Jednoznacznego. Dodatkowym powodem, dla którego wybrał on prosty geometrycznie kształt *Trzpienia Pozycjonującego* zbudowanego w oparciu o Modelowanie Hybrydowe do opisanego Modelowania Poziomego i Wieloobiektowego było jednoczesne przedstawienie wytycznych metodyki generowania poziomej topologii modeli CAD, jak i nakierowanie czytelnika na sposób wykorzystania kombinacji tych technik w możliwych dla przemysłu zastosowaniach, czyli w złożonych geometrycznie strukturach. W zasadzie tworzenie takich złożonych modeli 3D opiera się zawsze na tych samych wytycznych, tak więc jeśli pozna się te wytyczne na prostych przykładach, to jedyną trudnością będzie ich wprowadzenie i przestrzeganie w znacznie większej topologii modelu 3D. Autor w niniejszej pracy zdecydował się na zaprezentowanie w jaki sposób Modelowanie Jednoznacznego pomoże konstruktorowi zredukować, a czasem całkowicie wyeliminować, wszechobecną w systemach CAD dwuznaczność geometryczną, która to dwuznaczność uwidacznia się wraz z topologicznym wzrostem skomplikowania modelu 3D. Zatem uznał on, że najlepszym rozwiązaniem będzie wykorzystanie metodyki generowania złożonych strukturalnie modeli w procesie tworzenia ich prostych geometrycznie odpowiedników. Warto też zwrócić uwagę, że szeroko stosowana współcześnie technika Modelowania Bryłowego traci swoją uniwersalność i przystępność dla użytkownika wraz ze zwiększaniem złożoności geometrycznej konstruowanych modeli CAD i w opinii autora nie powinna być samodzielnie stosowana do tworzenia tego typu geometrii.



## Literatura

1. Allen, R. C. (2009). *The British Industrial Revolution in Global Perspective*. Cambridge University Press.
2. *A.M. Turing Award – Ivan Edward Sutherland*. Association for Computing Machinery. [https://amturing.acm.org/award\\_winners/sutherland\\_3467412.cfm](https://amturing.acm.org/award_winners/sutherland_3467412.cfm) dostępne na dzień 18.06.2023.
3. Birkhoff, G., Bartee, T. C. (1983). *Współczesna algebra stosowana*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
4. Boothroyd, G., Knight, W. A. (2006). *Fundamentals of Machining and Machine Tools – Third Edition*. CRC Press Taylor & Francis Group.
5. Brown, S. A., Drayton, C. E., Mittman, B. (1963). A description of the APT language. *Communications of the ACM* 6 (11).
6. Buchholz, E. L. (2005). *Leonardo da Vinci, Życie i twórczość*. Pracow. Wydawn. ElSet.
7. Chlebus, E. (2000). *Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
8. Clough, R. W. (1960). *The Finite Element Method in Plane Stress Analysis*. Proceedings, American Society of Civil Engineers, 2nd Conference on Electronic Computation.
9. Coyne, R. D., Rosenman, M. A., Radford, A. D., Balachandran, M., Gero, J. S. (1990). *Knowledge-Based Design Systems*. Addison-Wesley Publishing Company.
10. Dietrych, J. (1978). *System i konstrukcja*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
11. Dubisz, S. (2003). *Uniwersalny słownik języka polskiego Tom 2*. Wydawn. Nauk. PWN.
12. Euklides, Błaszczak, P., Mrówka, K. (2021). *Euklides Elementy. Teoria proporcji i podobieństwa*. Copernicus Center Press.
13. *Geoffrey Hinton*. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Geoffrey\\_Hinton](https://en.wikipedia.org/wiki/Geoffrey_Hinton) dostępne na dzień 18 czerwca 2023.
14. Gewert, M., Skoczylas, Z. (2012). *Elementy Analizy Wektorowej Teoria, przykłady, zadania*. Oficyna Wydawnicza GiS.
15. Harrington, J. (1979). *Computer Integrated Manufacturing*. Krieger Pub Co.
16. Hrennikoff, A., (1941). Solution of Problems in Elasticity by the Frame Work Method. *Journal of Applied Mechanics* 8 (4), 169–175.
17. Internetowa encyklopedia PWN. Wydawnictwo Naukowe PWN.
18. Johnson, T. E. (1964). *Sketchpad III A Computer Program for Drawing in Three Dimensions*. Massachusetts Institute of Technology.
19. Jonkisz, J., Makuch, J., Starzak, S. (1982). *Programowanie w językach ALGOL 60 i FORTRAN 1900*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.
20. Kepner, Ch., Tregoe, B. (1965). *The Rational Manager: A Systematic Approach to Problem Solving and Decision Making*. New York: McGraw-Hill.
21. Kiciak, P. (2019). *Podstawy modelowania krzywych i powierzchni. Zastosowania w grafice komputerowej*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
22. Knosala, R., Marek-Kołodziej, K., Oleszek, S. (2021). *Zarządzanie projektami innowacyjnymi. Aplikacje w środowisku PLM*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
23. Kost, G., Łebkowski, P., Węsierski, Ł. (2014). *Automatyzacja i Robotyzacja Procesów Produkcyjnych*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.

24. Krull, F. (1994). The Origin of Computer Graphics within General Motors. *IEEE Annals of the History of Computing* 3 (16).
25. Krzywa Béziera. Wikipedia. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Krzywa\\_B%C3%A9ziera](https://pl.wikipedia.org/wiki/Krzywa_B%C3%A9ziera) dostępne na dzień 18 czerwca 2023.
26. Kyoto Prize – Ivan Edward Sutherland. <https://www.kyotoprize.org/en/laureates/ivan-edward-sutherland/> dostępne na dzień 18 czerwca 2023.
27. Kyprianou, L. K. (1980). *Shape classification in Computer-Aided Design*. University of Cambridge.
28. Logan, D. L. (2006). *A First Course in the Finite Element Method*. CL-Engineering.
29. Łukasiewicz, J. (1907). O wnioskowaniu indukcyjnym. *Przegląd Filozoficzny X*, z. 4, 474–475.
30. Mackenzie, Ch. E. (1980). *Coded Character Sets, History and Development*. Addison-Wesley Publishing Company.
31. Mahoney, M. S., Taylor, N. H., Ross, D. T., Fano, R. M. (1989). *Retrospectives (I) – The Early Years in Computer Graphics*. Siggraph 1989 Panel Proceedings.
32. Maruszewski, T. (2001). *Psychologia poznania. Sposoby rozumienia siebie i świata*. Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne.
33. Medland, A. J., Burnett, P. (1986). *CAD/CAM in Practice: A Manager's Guide to Understanding and Using CAD/CAM*. British Library Cataloguing in Publication Data.
34. Nagel, R. N., Braithwaite, W. W., Kennicott, P. R. (1980). *Initial Graphics Exchange Specification IGES Version 1.0*. National Bureau of Standards.
35. Pirożyński, J. (2002). *Johannes Gutenberg i początki ery druku*. Wydawn. Nauk. PWN.
36. Pratt, M. J. (2001). Introduction to ISO 10303 - the STEP Standard for Product Data Exchange. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 3.
37. Pratt, M. J., Wilson, P. R. (1987). *Conceptual design of a feature-oriented solid modeler*. General Electric Corporate R&D.
38. Programowanie deklaratywne. Wikipedia. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Programowanie\\_deklaratywne](https://pl.wikipedia.org/wiki/Programowanie_deklaratywne) dost. na dzień 18.06.2023.
39. Redmond, K. C., Smith, T. M. (1980). *Project Whirlwind. The History of a Pioneer Computer*. Digital Press.
40. Reid, T. R. (2001). *The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution*. Random House Trade Paperbacks.
41. Ross, D. T. (1960). *Computer-Aided Design: A Statement of Objectives*. Massachusetts Institute of Technology.
42. Schaffel, K. (1990). *The Emerging Shield: The Air Force and the Evolution of Continental Air Defense 1945-1960*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.
43. Scheer, A. W. (1994). *CIM Computer Integrated Manufacturing – Towards the Factory of the Future*. Springer-Verlag.
44. Skarka, W. (2009). *CATIA V5. Podstawy budowy modeli autogenerujących*. Wydawnictwo Helion.
45. Skarka, W., Mazurek, A. (2005). *CATIA Podstawy modelowania i zapisu konstrukcji*. Wydawnictwo Helion.
46. Spline. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Flat\\_spline](https://en.wikipedia.org/wiki/Flat_spline) dostępne na dzień 18 czerwca 2023.

47. Stanisławski, M. (2008). Historia komputerowych systemów wspomagających projektowanie, wytwarzanie i analizy inżynierskie cz. I. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie 11* (14).
48. Sutherland, I. E. (1963). *Sketchpad: A man-machine graphical communication system*. Massachusetts Institute of Technology.
49. Świaczny, G. (2021). Influence of geometric features associativity of CAD class models on the process of their updating – comparative analysis. *Technical Sciences 24*, 257–271.
50. Świaczny, G., Wyleżoł, M. (2020). Doskonalenie topologii modeli CAD w kontekście ich podatności na zmiany konstrukcyjne – etap wprowadzania zmian. Część 2. *Mechanik 10*.
51. Świaczny, G., Wyleżoł, M. (2021). Efektywne tworzenie modeli 3D z użyciem systemów klasy CAX. Monografia: *Projektowanie, budowa i eksploatacja maszyn cz. I*, 207–218. Wydawnictwa Politechniki Opolskiej.
52. Tarczewski, R. (2011). *Topologia form strukturalnych. Naturalne i tworzone przez człowieka prototypy form konstrukcyjnych w architekturze*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
53. Tecklenburg, G. F. K. (2010). *Design of Automotive Body Assemblies with Distributed Tasks under Support of Parametric Associative Design (PAD)*. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the University of Hertfordshire for the degree of Doctor of Philosophy.
54. The New York Times.  
<https://www.nytimes.com/2023/05/01/technology/ai-google-chatbot-engineer-quits-hinton.html> dostępne na dzień 18 czerwca 2023.
55. Toriya, H., Chiyokura, H. (1993). *3D CAD Principles and Applications*. Springer-Verlag.
56. Uniwersytet HAW w Hamburgu. <https://www.haw-hamburg.de/>
57. Vlahos, Ch. J. (1968). *Fundamentals of numerical control*. The Book Abyss.
58. Waurzyniak, P. (2010). Masters of Manufacturing: Patrick J. Hanratty. *SME* July 1.
59. Węlyczko, A. (2005). *CATIA V5. Przykłady efektywnego zastosowania systemu w projektowaniu mechanicznym*. Wydawnictwo Helion.
60. Węlyczko, A. (2007). Kierunki rozwoju systemów CAD: KBE. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie 1* (01).
61. Węlyczko, A. (2008). Kierunki rozwoju systemów CAD: od KBD do KBE. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie 1/2* (04/05).
62. Węlyczko, A. (2010). *CATIA V5 Sztuka modelowania powierzchniowego*. Wyd. Helion.
63. Węlyczko, A. (2012). Dwuznaczność w modelowaniu przestrzennym cz.1. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie 12* (63).
64. Węlyczko, A. (2013). Modelowanie bryłowe; wybrane zagadnienia metodologiczne cz. 2. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie 7/8* (70/71).
65. Węlyczko, A. (2013). Modelowanie bryłowe; wybrane zagadnienia metodologiczne cz. 4. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie 10* (73).
66. Wiendahl, H. P., Köhrmann, C., Krüger T. (1997). Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung für Produktionssysteme. *ZWF* 92, 3.
67. Winkler, T. (1997). *Wspomaganie Komputerowe CAD/CAM – Komputerowy zapis konstrukcji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
68. Wyleżoł, M. (2002). *Modelowanie bryłowe w systemie CATIA. Przykłady i ćwiczenia*. Wydawnictwo Helion.
69. Wyleżoł, M. (2003). *CATIA. Podstawy modelowania powierzchniowego i hybrydowego*. Wydawnictwo Helion.



# Metodyka optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD

## Streszczenie

Praca stanowi próbę nowego podejścia do procesu optymalizacji struktury asocjatywnych modeli w systemach komputerowego wspomaganie projektowania CAD. Proces ten realizowany jest poprzez implementację autorskiej metodyki Modelowania Jednoznacznego.

Omówienie zagadnień związanych z modelowaniem w systemach komputerowego wspomaganie projektowania rozpoczęto od przedstawienia przesłanek, które mogłyby potwierdzać zasadność przeprowadzania w tej tematyce badań weryfikacyjnych. Mając na uwadze obecny stan wiedzy, sformułowano problem badawczy oraz określono cel rozprawy, którym było przedstawienie nowej, skutecznej metodyki optymalizacji struktury asocjatywnych modeli CAD. Następnie wysunięto cztery tezy rozprawy, poprzez które autor zwrócił uwagę na istotność danych wejściowych tworzonego modelu 3D oraz rolę, jaką w tym procesie odgrywają. W celu umiejscowienia w poruszanej tematyce autorskiej metodyki Modelowania Jednoznacznego, w dalszej kolejności odtworzono rys historyczny systemów CAD oraz opisano kluczowe techniki tworzenia modeli 3D w tych systemach. Następnie szczegółowo przedstawiono przedmiot badań autora, obejmujący: opis wpływu geometrii zorientowanej na proces modelowania we współczesnych systemach CAD, sformułowanie wytycznych techniki Modelowania Jednoznacznego, a także implementację tej techniki do kilku przykładowych modeli CAD. Istotnym elementem badań weryfikacyjnych była pomyślna próba implementacji proponowanej metodyki do innych badań nad efektywnością technik tworzenia modeli CAD, a co za tym idzie – zrewidowania ich wniosków i ustanowienia nowych – uwzględniających Modelowanie Jednoznacznego.

Dzięki proponowanej metodyce możliwe stało się wyeliminowanie dwuznaczności geometrycznej charakterystycznej dla geometrii zorientowanej wykorzystywanej we współczesnych systemach CAD, a co za tym idzie – wykorzystywanej w procesie tworzenia modeli 3D, bez angażowania do tego procesu zaawansowanych modułów tych systemów. Do sformułowania wytycznych Modelowania Jednoznacznego – Procedury Jednoznacności i Procedury Neutralności, autor użył narzędzi programowych bazujących na podstawowych założeniach każdego współczesnego parametrycznego systemu CAD. W ten sposób dostępność proponowanej metodyki nie została ograniczona tylko dla użytkowników korzystających z najbardziej zaawansowanego oprogramowania.

Optymalizacja struktury asocjatywnych modeli CAD nie jest częstym przedmiotem badań i rozwoju w sferze naukowej, jak i gospodarczej. Autor podjął próbę zwrócenia uwagi tych sfer na powyższą tematykę poprzez wykazanie korzyści wynikających z tej optymalizacji. Korzyści te objawiły się podczas badań weryfikacyjnych, w których transformacje geometryczne przykładowych modeli 3D nie miały negatywnego wpływu na stabilność topologiczną i geometryczną tych modeli. Tym samym zostały potwierdzone wysunięte na wstępie pracy tezy.

**Słowa i zwroty kluczowe:** model 3D, system CAD, geometria zorientowana, dwuznaczność geometryczna, asocjatywność, parametryczność, optymalizacja, metodyka, procedura

**Dziedziny:** inżynieria mechaniczna

# Methodology for optimizing the structure of associative CAD models

## Summary

The dissertation is an attempt at a new approach to the process for optimizing the structure of associative models in Computer-Aided Design (CAD) systems. This process is realized through the implementation of the author's methodology of *Unambiguous Modeling*.

The discussion of issues related to modeling in computer-aided design systems began with the presentation of premises that could confirm the legitimacy of conducting verification research in this area. Considering the current state of knowledge, a research problem was formulated, and the aim of the dissertation was defined, which was to present a new, effective methodology for optimizing the structure of associative CAD models. Next, four theses of the dissertation were propounded, through which the author drew attention to the importance of the input data of the created 3D model and the role they play in this process. In order to place the author's methodology of *Unambiguous Modeling* in the discussed topic, the historical outline of CAD systems was reproduced and the key techniques of creating 3D models in these systems were described. Then, the subject of the author's research was presented in detail, including: a description of the influence of the oriented geometry on the modeling process in modern CAD systems, formulation of the guidelines of the *Unambiguous Modeling* technique, as well as the implementation of this technique to several exemplary CAD models. An important element of the verification research was a successful attempt to implement the proposed methodology to other research on the efficiency of CAD modeling techniques, and thus - to revise their conclusions and establish new ones - considering *Unambiguous Modeling*.

Thanks to the proposed methodology, it has become possible to eliminate the geometric ambiguity characteristic of the oriented geometry used in modern CAD systems, and thus – used in the process of creating 3D models, without involving advanced modules of these systems in this process. To formulate the guidelines for *Unambiguous Modeling* – the *Unambiguity Procedure* and the *Neutrality Procedure*, the author used software tools based on the basic assumptions of each modern parametric CAD system. In this way, the availability of the proposed methodology has not been limited only to users using the most advanced software.

Optimization of the structure of associative CAD models is not a frequent subject of research and development in the scientific and economic spheres. The author made an attempt to draw the attention of these spheres to the above subject by showing the benefits of this optimization. These benefits were revealed during the verification research, in which the geometric transformations of the exemplary 3D models did not have a negative impact on the topological and geometric stability of these models. Thus, the theses propounded at the beginning of the dissertation were confirmed.

**Key words and phrases:** 3D model, CAD system, oriented geometry, geometric ambiguity, associativity, parametricity, optimization, methodology, procedure

**Fields:** mechanical engineering