

Elementy liniowe

Wprowadzenie

W systemach CAD elementy liniowe zwane ogólnie krzywymi mają istotne znaczenie przy modelowaniu brył. W geometrii są dziesiątki krzywych opisanych analitycznie (proste, elipsy, cykloidy, spirale, ewolwenty itp.). Uwzględnienie przez programy CAD wszystkich istniejących krzywych jest niemożliwe, bo ich liczba jest niezliczona. Podobnie niezliczona jest liczba krzywych opisujących rzeczywiste obiekty. Takich krzywych nie da się na ogół przedstawić w postaci analitycznej, a jedynie w postaci skończonego zbioru wybranych z nich punktów tzw. węzłów. W tym ostatnim przypadku krzywe muszą być interpolowane. Zaistniała zatem potrzeba stworzenia uniwersalnego sposobu reprezentacji dowolnych krzywych, łatwego w implementacji komputerowej oraz pozwalającego na intuicyjne operowanie nią przez użytkownika oprogramowania. Problem ten rozwiązali niezależnie od siebie francuscy inżynierowie Pierre Bézier (Renault) i Paul de Casteljau (Citroën), opracowując tzw. *krzywe Béziera*¹, które są składnikami bardziej uniwersalnych krzywych, zwanych *krzywymi B-sklejanymi* lub *splajnami*.

Krzywe służą do reprezentowania profili definiujących bryły, krawędzi brył i krawędzi definiujących powierzchnie w modelowaniu powierzchniowym oraz, jako elementy pomocnicze, do konstruowania innych obiektów. SE wyróżnia dwa rodzaje krzywych:

- (a) Krzywe analityczne – prosta oraz okrąg, elipsa, krzywe stożkowe i ich łuki.
- (b) Krzywe B-sklejane 2D i 3D (ang. *b-spline*)



Krzywe analityczne są to krzywe zdefiniowane parametrycznie w oparciu o funkcje standardowe, znane z kursów algebry lub analizy matematycznej. Krzywe B-sklejane są łańcuchami połączonych ze sobą krzywych Béziera tak dobranych, by przechodziły gładko przez zadany zbiór punktów.


Uwaga! Ze względu na przyjęte w programie SE nazewnictwo termin *elementy liniowe* lub *linie* będzie dalej używany na określenie zarówno prostych, jak i krzywych dowolnego typu, a termin *krzywe* będzie zarezerwowany tylko na krzywe B-sklejane.

W SE elementy liniowe można tworzyć w następujący sposób:

- (i) Szkicami 2D, 3D
- (ii) Poleceniami rysowania bezpośredniego.
- (iii) Metodami pośrednimi przez przekształcania istniejących krzywych.

Szkice 3D

Są dwa rodzaje szkiców. Pierwszy to poznany na kursie podstawowym szkic planarny (2D) tworzony jako obiekt globalny poleceniem  **Szkic** lub, jako obiekt lokalny, w ramach innych operacji bazujących na szkicach (wyciągnięcia). Drugi typ szkicu, to szkic przestrzenny 3D. Szkic 3D tworzy się w trybie sekwencyjnym (TT) poleceniem  **Szkic 3D**, a w trybie synchronicznym (ST) za pomocą poleceń rysowania dostępnych na karcie **Szkicowanie 3D**.

W trybie TT polecenie **Szkic 3D** wywołuje osobne środowisko rysowania z własnym menu wstążkowym, którego podstawową kartą (wstążką) jest karta **Narzędzia główne**. Analogicznie jak w szkicu planarnym do zakończenia pracy i wyjścia z środowiska służy dostępny w dwóch miejscach przycisk  **Zamknij szkic 3D** (rys.1). W trybie ST środowisko szkicowania 3D jest dostępne bezpośrednio podobnie jak środowisko szkicowania 2D.

¹ Nazwisko de Casteljau posłużyło jako nazwa algorytmu rysowania krzywych Béziera.



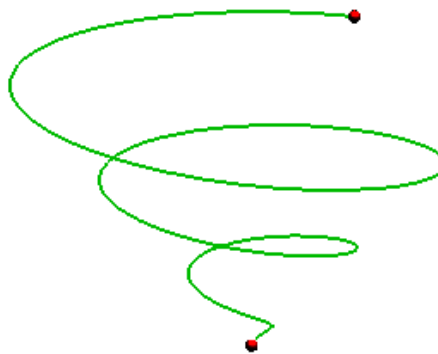
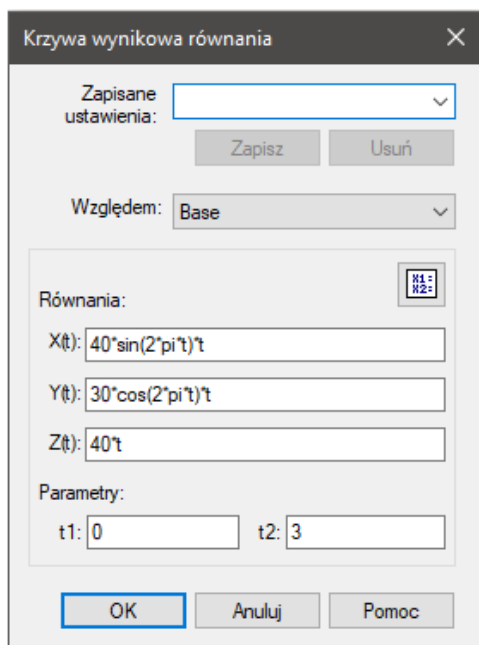
Rys.1. Menu wstążkowe dla środowiska szkicowania 3D – karta **Narzędzia główne**.

Repertuar elementów geometrii 3D dostępnych w tym środowisku (panel Rysuj 3D) pozwala na utworzenie następujących elementów:

- odcinka – **Linia 3D**,
- okręgu – **Okrąg 3D wg punktu środkowego**,
- łuku – **Styczny łuk 3D**, **Łuk 3D z 3 punktów**,
- punktu – **Punkt 3D**.
- krzywej B-sklejanej – **Krzywa 3D**,
- krzywej danej wzorem parametrycznym – **Krzywa wynikowa równania**.


Polecenia **Prostokąt 3D z środka** oraz **Zaokrąglenie 3D** są poleceniami proceduralnym. Pierwsze polecenie formuje prostokąt z 4 odcinków, a drugie gładko łączy łukiem dwa odcinki przesuwając odpowiednio ich końce. Polecenie **Włącz do szkicu 3D** powoduje skopowanie krawędzi obiektów do szkicu.

Nowością od wersji SE 2022 jest polecenie **Krzywa wynikowa równania**, które pozwala utworzyć krzywą na podstawie równań parametrycznych $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Równania wpisuje się w odpowiednich polach okna dialogowego (rys. 2). W równaniach stosuje się te same operatory i funkcje, których używa się do definiowania formuł w oknie **Tabela zmiennych**.






Rys. 2. Okno dialogowe definicji krzywej parametrycznej. Wpisane równania opisują spiralę o 3 zwojach i skoku 40 mm opisaną na stożku eliptycznym. Zmienna pi jest dostępna standardowo jako liczba $\pi = 3,151592 \dots$


W równaniach należy użyć zmiennej o nazwie t, która reprezentuje parametr. Zakres jej zmienności ustala się w polach t1, t2. Symbole o innych nazwach powinny być zdefiniowane

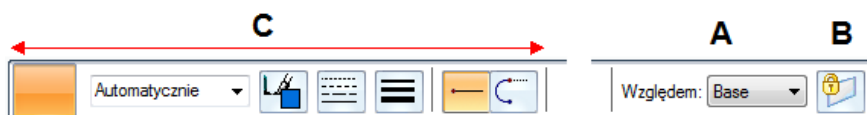
w tabeli zmiennych, którą można przywołać przyciskiem  **Tabela zmiennych**. Krzywa jest rysowana względem wybranego układu współrzędnych – pole Względem.

Polecenie **Krzywa 3D** odpowiada poleceniu **Krzywa wg punktów charakterystycznych**, którego obsługa jest opisana dalej.

Zestaw relacji oraz punktów kluczowych w panelach Relacje 3D i IntelliSketch3D w stosunku do szkiców planarnych jest rozszerzony o relacje  **Rzutuj punkt charakterystyczny**,  **Współosiowość** oraz  **Punkt edycji**. *Większość linii utworzonych poleceniami szkicowania 3D da się wykonać przy pomocy szeregu szkiców 2D tyle tylko, że większym nakładem pracy i przy pomocy dodatkowych elementów konstrukcyjnych.*


Tworzenie szkicu polega na wstawianiu w przestrzeni elementów liniowych 3D lub punktu oraz ograniczaniu ich za pomocą relacji 3D i więzów wymiarowych.

W czasie tworzenia elementów z kursorem skojarzone są linie odniesienia (kolorowe proste równoległe do aktualnego układu współrzędnych), których widoczność włącza się przyciskiem  **Pokaż linie odniesienia w 3D**. Po wywołaniu polecenia rysowania na ekranie ukazuje się triada współrzędnych *OrientXpres*, której osie są równoległe do wybranego układu współrzędnych. *Dla ułatwienia wprowadzania punktów warto zawczasu zdefiniować pomocnicze układy współrzędnych.*




Rys.3. Elementy paska poleceń szkicowania 3D

W trakcie realizacji każdego polecenia 3D tworzącego nowy element można:


1. Wybrać układ współrzędnych, względem którego mają być wprowadzane punkty (rys.3.) lista **A** – Względem. Układy współrzędnych zdefiniowane w trybie sekwencyjnym są uznawane też w trybie synchronicznym.
2. Klawiszem **X** ograniczyć ruchy kursora do płaszczyzny równoległej do jednej z płaszczyzn głównych wybranego układu współrzędnych. Płaszczyzna ta przechodzi przez wprowadzony pierwszy punkt tworzonego obiektu lub punkt początkowy układu współrzędnych. Każde wciśnięcie **X** przełącza cyklicznie na następną płaszczyznę. Odblokowanie klawiszem **C**.
3. Klawiszem **Z** ograniczyć ruchy kursora wzdłuż prostej równoległej do jednej z osi wybranego układu współrzędnych. Prosta ta przechodzi przez wprowadzony pierwszy punkt tworzonego obiektu lub punkt początkowy układu współrzędnych. Każde wciśnięcie **Z** przełącza cyklicznie na następną oś. Odblokowanie klawiszem **C**.
4. Po kliknięciu w przycisk **B** (rys.3.) –  **Zablokuj płaszczyznę szkicu** – wybrać istniejącą płaszczyznę lub lico, do którego mają być ograniczone ruchy kursora. Po zablokowaniu płaszczyzny triada *OrientXpres* ustawia się równoległe do tej płaszczyzny, a jej ramiona oznakowane są literami **V** (*vertical* – kierunek pionowy) i **H** (*horizontal* – kierunek poziomy). Odblokowanie klawiszem **F3** lub przyciskiem **F3** na ekranie.



Punkty 2 i 3 opisują obsługę triady *OrientXpres* i można je zrealizować także kliknięciem w jej ramiona lub płaszczyzny. Triadę można przeciągać w inne miejsce trzymając za jej punkt początkowy (żółta kulka).

Zablokowanie ruchu kursora do płaszczyzny (punkty 2 i 4) i włączenie relacji **Rzutuj punkt charakterystyczny** spowoduje, że wybranym punktem tworzonego elementu będzie rzut wskazanego punktu na zablokowaną płaszczyznę. W przypadku ograniczenia ruchu kursora do osi (punkt 3), wybranym punktem będzie rzut wskazanego punktu na ustalony oś kierunku niezależnie od stanu aktywności relacji **Rzutuj punkt charakterystyczny**. Jeżeli

włączona jest relacja  **Współosiowość**, to podczas rysowania odcinka od środka lica kołowego, drugi jego punkt, po rozpoznaniu relacji, będzie umieszczany na linii prostopadłej do tego lica.

Zasada! Poruszający się swobodnie kursor wskazuje punkt na płaszczyźnie *równoległej do płaszczyzny ekranu* przechodzącej przez początek wybranego (lista **A**) układu współrzędnych lub przez ostatnio wprowadzony punkt tworzonego elementu liniowego.


Aby zapanować nad szkicem 3D należy w odpowiednim momencie zakładać relacje 3D oraz ograniczać elementy za pomocą więzów wymiarowych (polecenie  **SmartDimension** i inne).

W środowisku ST utworzenie kolejnego szkicu, z wyjątkiem pierwszego, inicjuje się poleceniem  **Nowy szkic 3D**. Każdy szkic reprezentowany jest w PF wpisem w gałęzi Szkice 3D i nosi domyślną nazwę Szkic 3D_n, np. **Szkic 3D_2**, którą oczywiście można zmienić. Szkic, który jest aktualnie edytowany, oznakowany jest symbolem ołówka np. **Szkic 3D_3**. Każde użycie poleceń szkicowania 3D dodaje nowe elementy do szkicu aktualnego. Zmianę szkicu aktywnego realizuje się poleceniem  **Uaktywnij**, wydany z menu kontekstowego.


Krzywe (splajny)

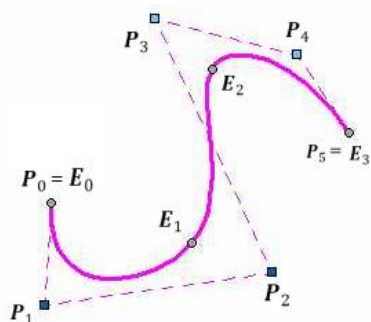
W SE pojęcie *krzywa* odnosi się do stosowanej w grafice komputerowej krzywej B-sklejanej. Krzywe w SE są opisane parametrycznie wielomianami, tak dobranymi, by przechodziły gładko przez szereg wskazanych punktów. W użyciu są najczęściej wielomiany stopnia trzeciego (*wielomiany kubiczne*), co jest kompromisem między możliwie niską złożonością obliczeniową związaną z rysowaniem, a możliwie wysoką dokładnością reprezentowania krzywej interpolowanej. Trzeci stopień wielomianu gwarantuje ciągłość pierwszej pochodnej, decydujący o gładkości krzywej (braku ostrzy) i ciągłość drugiej pochodnej (ciągłość krzywizny), która wprawdzie nie daje bezpośredniego efektu wizualnego, ale może mieć znaczenie techniczne. Drugi stopień gwarantuje tylko gładkość krzywej. Stopnie wyższe gwarantują gładkości wyższego rzędu wraz z ciągłością odpowiednich pochodnych wielomianów parametryzujących krzywą.

Z krzywymi związane są dwa rodzaje punktów: *punkty edycji*, czyli węzły linii (E_i na rys.4), przez które przechodzi krzywa oraz *punkty sterujące (kontrolne)* P_i , które z wyjątkiem pierwszego i ostatniego nie należą do krzywej, a które określają jej kształt. Krzywa jest jednoznacznie określona punktami kontrolnymi, a punkty edycji stanowią jedynie ułatwienie w jej kształtowaniu.

 Krzywa jest styczna na swoich końcach do krańcowych segmentów łamanej sterującej, czyli w punkcie P_0 do odcinka P_0P_1 i w P_n (końcowym) do odcinka $P_{n-1}P_n$ – na rys. 4 są to punkty P_4P_5 .

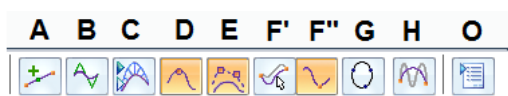
Krzywa planarne (2D)

W SE do rysowania krzywych B-sklejanych planarnych służy polecenie  **Krzywa** dostępne w trybie TT w środowisku szkicownika oraz bezpośrednio w trybie ST w panelu Szkicowanie. Krzywą (rys.4.) prowadzi się podając kolejne jej węzły E_i , których wprowadzanie kończy się kliknięciem prawego przycisku myszy PPM. Nie ma możliwości narysowania krzywej przez podawanie tylko jej punktów sterujących P_i jak to ma miejsce np. w programie AutoCAD. Krzywą można narysować też metodą szkicowania, tzn. ciągnąc mysz po ekranie z przytrzymanym lewym przyciskiem LPM, ale wówczas nie posiada ona punktów edycji.



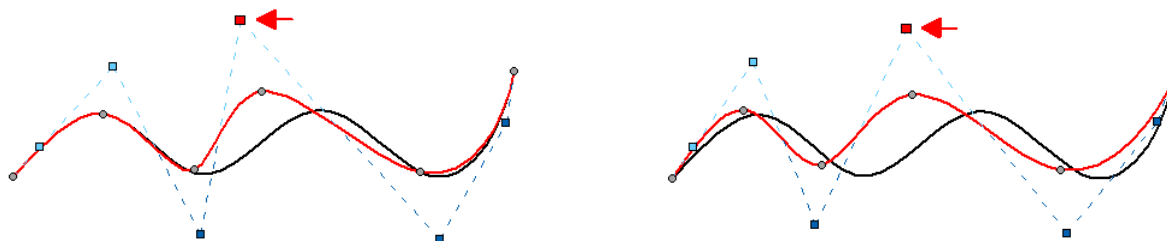
Rys.4. Krzywa (splajn) w edytorze SE. E_i – punkty edycji, P_i – punkty kontrolne (de Boora)

Po rozpoczęciu rysowania krzywej, w opcjach **O** (rys.5) polecenia można wybrać jej stopień z zakresu 2 – 10. Przy pominięciu tego punktu standardową wartością jest 3. Do narysowania krzywej, bez względu na jej stopień, trzeba określić co najmniej 3 punkty edycji E_i .



Rys.5. Fragment pasek polecenia **Krzywa**

Krzywą edytuje się tym samym paskiem (rys.5), który był używany do jej tworzenia. Przyciskami **D** – **Pokaż punkty edycji** oraz **E** – **Pokaż punkty wierzchołka sterującego**, ujawnia się lub ukrywa punkty edycji i punkty sterujące. Wszystkie dostępne punkty można przeciągać w nowe położenie zmieniając w ten sposób kształt krzywej.

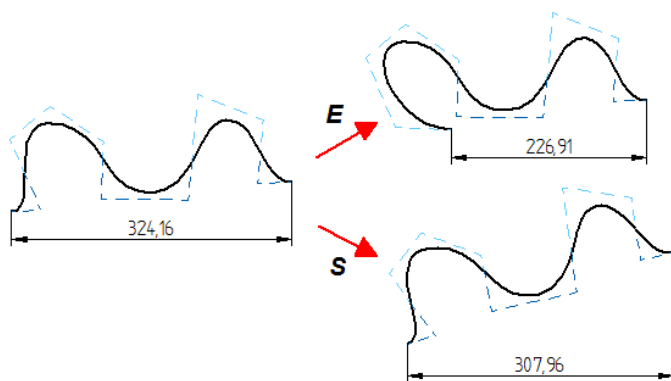


Rys.6. Edycja lokalna (lewy) a Edycja kształtu (prawy)

Sposób reakcji krzywej (rys.6) na zmianę położenia punktu określają przyciski **F**. Przycisk **F'** – **Edycja lokalna** powoduje lokalną zmianę krzywej, tzn. ograniczoną tylko do jej fragmentu między sąsiednimi punktami kontrolnymi. Przycisk **F** – **Edycja kształtu** powoduje zmianę położenia wszystkich punktów, przy czym zmiany są tym mniejsze im dalej od punktu zmienianego. Punkty krańcowe nie ulegają przesunięciu w czasie edycji punktów wewnętrznych. Warto zauważyć, że punkty te są jednocześnie punktami edycji i punktami sterującymi. Oba rodzaje punktów mogą być użyte do zakładania relacji i wymiarów. W ten sposób można kontrolować przebieg krzywej.

Liczbę punktów sterujących można zmienić przez zmianę stopnia krzywej w opcjach polecenia. Po podwyższeniu stopnia, krzywa zachowuje swój kształt, ale po obniżeniu już nie. W opcjach można też ustawić tryb relacji, czyli jaki jest wpływ więzów geometrycznych i wymiarowych na kształt krzywej. Dostępne opcje to: Elastyczny i Sztywny. W trybie elastycznym wpływ na kształt krzywej mają relacje zewnętrzne, a w trybie sztywnym nie, co ilustruje rys.7.

Dodanie i usuwanie punktów edycji nie zmienia kształtu krzywej. Przytrzymując **ALT** można dodać nowy punkt klikając w dowolne miejsce na krzywej, inne od widocznych punktów edycji, albo usunąć punkt edycji klikając w niego. Alternatywnie można użyć przycisku **A** – **Dodaj/Usuń punkty**. Zbyt wijącą się krzywą można uprościć aktywując przycisk **H** – **Uprość krzywą**.



Rys.7. Wpływ trybu relacji na możliwości edycyjne krzywej po zmianie wymiaru zewnętrznego: E – elastyczny (zmiana kształtu), S – sztywny (kształt bez zmian, ale zmieniła się orientacja krzywej).

Krzywą można zamknąć uaktywniając przycisk **G** – **Zamknij krzywą**. Ponadto aktywując przycisk **B** – **Pokaż wielokąt** można sprawić, że łamana kontrolna (wielokąt) jest widoczna po zakończeniu edycji, co czasami ułatwia zakładanie relacji i wymiarowanie. Łamana kontrolna łączy punkty kontrolne krzywej.

Alternatywną metodą tworzenia krzywej jest przekształcenie istniejących linii analitycznych (prosta, okrąg, elipsa itd.) w krzywe za pomocą polecenia **Konwertuj do krzywej** (panel Rysuj). Po wykonaniu polecenia linia nie zmienia kształtu, a tylko staje się splajnem.

Wykorzystując to polecenie można utworzyć krzywą bez punktów edycji. W tym celu należy narysować odcinek i przekształcić go w krzywą. Otrzymana krzywa będzie stopnia 2 (patrz zad. 4.) i będzie opisana 3 współliniowymi punktami sterującymi, stąd dalej będzie wyglądała jak odcinek. Dla uzyskania efektu trzeba jeden z punktów przesunąć. Po zmianie jej stopnia na wyższy zostaną dodane nowe punkty sterujące. Uzyskana w ten sposób krzywa jest krzywą Béziera, czyli jednosegmentową krzywą B-sklejaną.

Na punkty kontrolne krzywej można zakładać relacje geometryczne i wymiarowe. Jest to jedyny sposób na świadome kształtowanie przebiegu krzywej.

Krzywe przestrzenne (3D)


Są dwie metody ich tworzenia: poleceniami rysowania bezpośredniego lub metodami pośrednimi. Do metod rysowania bezpośredniego zalicza się polecenia **Krzywa wg punktów charakterystycznych**, **Krzywa według tabeli** i **Na powierzchni**. Metody pośrednie to polecenia przekształcające istniejące krzywe w inne krzywe. Zalicza się do nich polecenia: **Rzutowana**, **Owiń szkic** (umieszczające szkice planarne na powierzchniach zakrzywionych), **Wypadkowa**, **Pochodna** oraz polecenia wykorzystujące lica i powierzchnie do generowania krzywych takie jak **Przenikanie** oraz **Izoklina**. Wszystkie polecenia zebrane są na wstążce **Powierzchnie**.

Krzywa wg punktów charakterystycznych

Polecenie **Krzywa wg punktów charakterystycznych** (rys.8) tworzy krzywą przestrzenną biegnącą przez wskazane punkty. W trakcie polecenia wyświetlana jest triada *OrientXpres* – jej obsługa jest opisana przy omawianiu polecenia **Szkic 3D**.

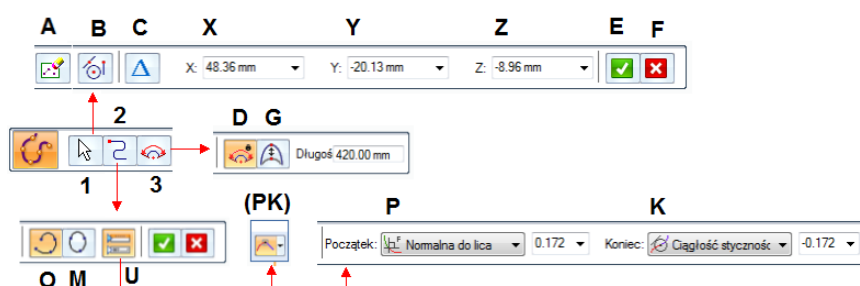
Krok 1 – **Wybór punktów** polega na wskazywaniu kolejnych punktów przez, które ma przechodzić krzywa. Wprowadzanie punktów można realizować na trzy sposoby.

1. Wskazywanie punktów kluczowych, których wybór można ograniczyć do typów wskazanych po użyciu przycisku **B** – **Punty charakterystyczne**.
2. Wpisywanie współrzędnych punktów w polach **X**, **Y**, **Z**. Te pola są dostępne kiedy przyciskiem **Punty charakterystyczne** wybierze się pozycje Wszystkie albo Pozycje XYZ. Wprowadzenie punktu następuje po naciśnięciu ENTER niezależnie od tego w jakim polu





jest kursor dlatego, dopóki wszystkie dane nie zostaną wypełnione, po polach edycyjnych należy poruszać się myszą lub klawiszami: TAB (przejsięcie w prawo) albo SHIFT+TAB (przejsięcie w lewo). Współrzędne podaje się względem początku głównego układu współrzędnych (Base). Jeśli przycisk **C** –  **Pozycjonowanie względne/bezwzględne** jest aktywny to punkty podaje się względem ostatniego punktu.




3. Klikanie LPM w dowolnym miejscu na ekranie i wówczas obowiązuje ta sama reguła co przy szkicu 3D (patrz **Zasada**).



Do korekcji położenia wprowadzonych punktów służy przycisk **A**, jednakże jego użycie w trakcie prowadzenia krzywej powoduje zakończenie kroku. Dlatego korekcję punktów już wstawionych lepiej wykonać dopiero po jego zakończeniu – szczegóły na końcu podrozdziału. Krok kończy standardowa akceptacja po czym program proponuje zakończenie polecenia. Aby wykonać omińnięte kroki lub skorygować wykonane trzeba użyć pozostałych przycisków *SmartStep*.



Rys.8. Pasek poleceń rysowania krzywej wg punktów.

Krok 2 –  **warunki zakończenia** określa czy krzywa ma być zamknięta czy otwarta (przyciski **M**  i **O** ) oraz warunki styczności w punktach krańcowych. Ustala się to albo na ekranie posługując się *uchwytyami kontroli styczności (PK)*, albo w pasku za pomocą pól **P** i **K**, które są wyświetlane po wyłączeniu przycisku **U** . Wybierając z listy pozycję *Ciągłość styczna* lub *krzywizny* możemy wskazać krawędź, do której krzywa ma być styczna a w polu obok długość wektora styczności. Im dłuższy tym bardziej krzywa przylega do krawędzi. Wektor ten jest dodatkowo wyświetlany na ekranie w postaci czerwonego odcinka. Chwytając LPM za jego koniec możemy dynamicznie dopasować długość stycznej. Podobnie wybór pozycji *Normalna do lica* pozwala wybrać lico i ustalić długość normalnej albo w polu edycyjnym, albo przeciągając myszą widoczny na ekranie wektor normalny. Efekty końcowe można zobaczyć przyciskiem **Podgląd** a polecenie zakończyć przyciskiem **Zakończ**.

Krok 3 –  **długość krzywej** służy do ustawienia całkowitej długości krzywej i jej zablokowania na czas edycji. Przycisk **D** –  **Stała długość** blokuje długość krzywej na wartość wpisaną obok. Przycisk **G** –  **Kierunek utwierdzenia** umożliwia zdefiniowanie kierunku, w którym będą się przesuwać punkty kontrolne podczas zmiany długości krzywej. Kierunek można określić osiami *X, Y, Z* bądź z dowolną krawędzią liniową.



Do wykonania zmian trzeba wywołać edycję definicji operacji. Aby przededefiniować punkt trzeba kliknąć w przycisk  **wybór punktów**. Potem można albo przeciągać LPM punkty w nowe położenie; albo użyć przycisku  **Przededefiniuj punkt** lub klawisza R, wskazać LPM punkt do edycji i zastosować jeden z trzech wyżej wymienionych sposobów wprowadzania punktu. Sposób obsługi jest w pasku podpowiedzi.

Nowy punkt na linii dodaje się klikając w linię z przytrzymanym ALT w miejscu gdzie ma się on pojawić. Podobnie usuwa się punkty, czyli klikając w nie z przytrzymanym klawiszem ALT. Jeśli trzeba wydłużyć krzywą o jeden punkt, to należy kliknąć poza linią z przytrzymanym ALT bliżej tego końca, który ma być przedłużony.



💡 Czasem łatwiej jest to zrobić przedstawiając punkt końcowy na miejsce, gdzie miałby się znaleźć nowy punkt wydłużający linię a potem dodać przed nim nowy punkt w starym położeniu punktu końcowego.

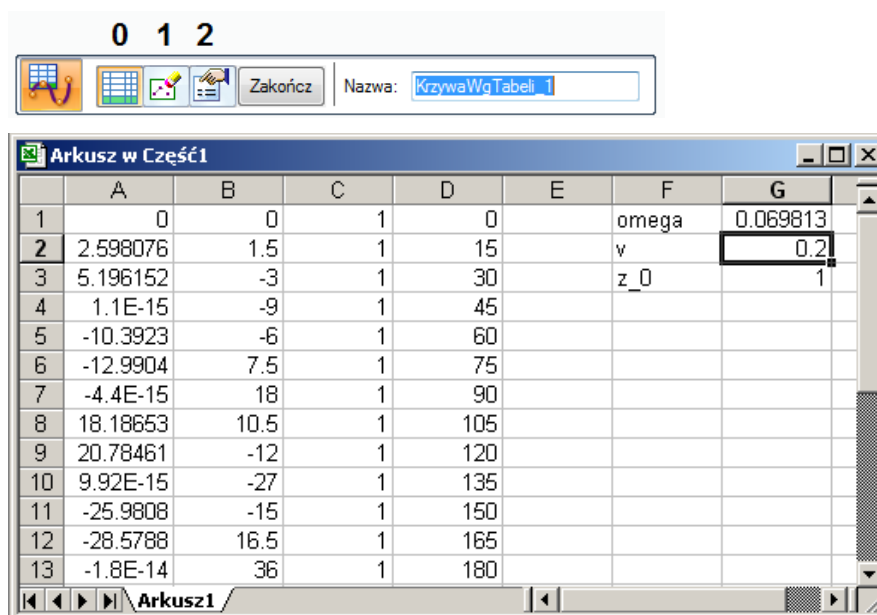
⚠️ W trybie ST po zakończeniu modelowania krzywej nie ma możliwości jej edycji przez korekcję punktów wprowadzonych podczas jej tworzenia. Jedyną operacją jaką można wykonać jest zmiana jej położenia i orientacji przy pomocy koła sterującego.

Krzywa według tabeli

Polecenie  **Krzywa według tabeli** (rys. 9) służy do zdefiniowania krzywej punktami węzłowymi, których współrzędne są pobrane z arkusza kalkulacyjnego *Excel*, przy czym arkusz może znajdować się we wcześniej przygotowanym pliku **xls...** lub być utworzonym trakcie polecenia. Ustalane jest to w kroku **0** –  **wybór tabeli** w oknie dialogowym **Wstaw obiekt**. Zasada wypełniania arkusza jest następująca.

Kolumny A, B, C są przeznaczone tylko na współrzędne punktów krzywej, odpowiednio (x, y, z) . Każdy wiersz, począwszy od pierwszego, definiuje dokładnie jeden punkt. Pod uwagę brany jest tylko pierwszy arkusz i zakres **A1 : Cn** (n – liczba punktów). ⚠️ Nie wolno umieszczać w pierwszym wierszu opisów kolumn.

Część arkusza poza obszarem **A1 : Cn** jest do dyspozycji użytkownika i może służyć do zdefiniowania danych pomocniczych. Arkusz na podstawie, którego utworzono krzywą (nawet ten z pliku zewnętrznego) staje się częścią pliku **par**. Edycji danych w arkuszu dokonuje się przyciskiem **1** –  **edycja punktów**. Przycisk **2** –  **parametry** pozwala określić dopasowanie krzywej (segmentami liniowymi lub krzywoliniowymi wygładzanymi lub nie) oraz warunki zakończenia (zamknięta, otwarta) a także układ współrzędnych, do którego odnoszą się współrzędne punktów.



Rys.9.


Polecenie krzywa wg tabeli. Kolumny A, B, C arkusza zawierają współrzędne x, y, z punktów. W kolumnie D umieszczono wartości parametru t , wg którego obliczane są współrzędne.

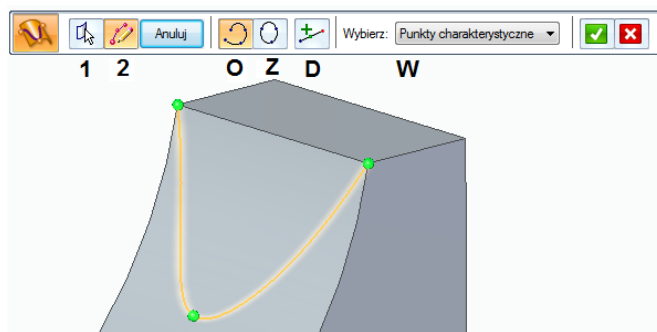
Przykład przedstawia tworzenie spirali Archimedesesa wg wzorów:
 $x(t) = v t \sin(\omega t)$
 $y(t) = v t \cos(\omega t)$
 $z(t) = z_0$

Cała tajemnica rysowania krzywych polega na znajomości równań $x(t), y(t), z(t)$ określających współrzędne krzywej w funkcji parametru t , który przebiega wartości zależne od przyjętych równań. Wartości parametru t odpowiadające punktom krzywej umieszcza się, w dowolnym miejscu arkusza nie kolidującym z zakresem **A1 : Cn** najlepiej w kolumnie obok – na rys.9 jest to kolumna **D**. Parametry i stałe potrzebne we wzorach

wpisuje się w innych komórkach tabeli. Warto skorzystać z możliwości nadawania komórkom indywidualnych nazw (*Excel* menu: **Wstaw** → **Nazwa** → **Definiuj** lub wpisanie jej bezpośrednio w polu nazwy komórki obok paska formuł), którymi można się posłużyć później we wzorach definiujących równania współrzędnych. Jeśli nie jest znana postać parametryczna krzywej, np. w przypadku krzywej opisującej obiekt rzeczywisty, to w wierszach arkusza powinny się znaleźć współrzędne punktów węzłowych pobranych (zmierzonych) z odpowiednich miejsc krzywej rzeczywistej. Przykład wykonania w zad. 6.


Krzywa na powierzchni

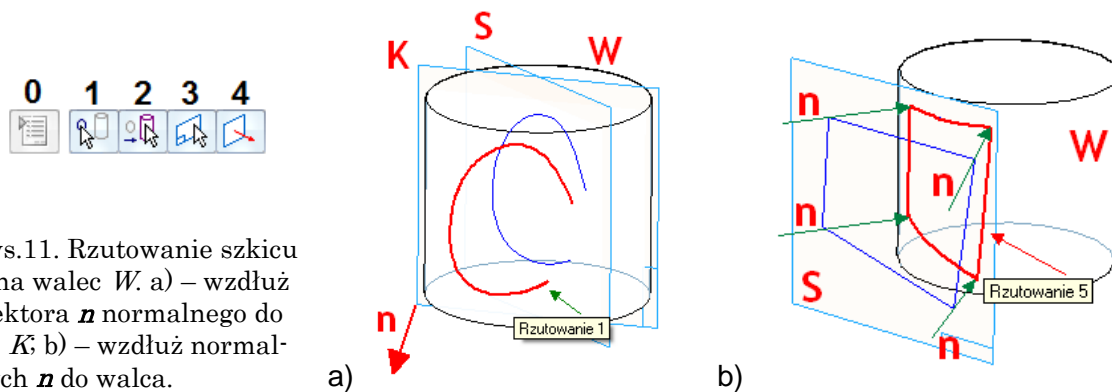
Polecenie  **Na powierzchni** (rys.10) służy do rysowania krzywej bezpośrednio na powierzchni. Podczas definiowania lic docelowych, na których ma być rysowana krzywa można wybrać zarówno jedno lico, jaki wiele lic. Rysowanie jest ograniczone wyłącznie do pokazanego na ekranie regionu. Krzywe wykraczające poza niego zostaną przycięte. Do definiowania punktów krzywej można użyć istniejących punktów definiowania powierzchni, takich jak wierzchołki, punkty środkowe linii oraz krawędzie powierzchni. Może dodawać i usuwać punkty przebiegu krzywej, a także dowolnie przeciągać je po powierzchni.



Rys.10. Polecenia krzywa na powierzchni.


Krzywe rzutowana

Polecenie  **Rzutowana** tworzy krzywą powstałą z rzutowania szkicu 2D na lico bryły, lub innej powierzchni. Rzutowanie wykonuje się dwoma sposobami: albo wzdłuż wektora albo wzdłuż normalnych do powierzchni. Sposób rzutowania określa się w opcjach polecenia **0**. Kolejne kroki polegają na wskazaniu: **1** – szkicu; **2** – lica, na które się je rzutuje. Dodatkowe kroki tylko dla metody pierwszej to **3** – płaszczyzny, której normalna wyznacza kierunek rzutowania i **4** – strony rzutowania. W ostatnim kroku umieszczając kursor nad punktem początkowym dynamicznej strzałki kierunku można uzyskać rzut w dwóch kierunkach jednocześnie, o ile jest to możliwe.

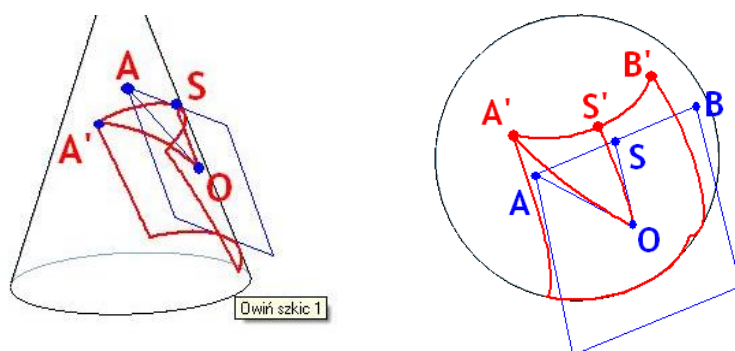


Rys.11. Rzutowanie szkicu S na walec W . a) – wzdłuż wektora n normalnego do pł. K ; b) – wzdłuż normalnych n do walca.

Owijanie szkicu na powierzchni

Polecenie  **Owiń szkic** rys.12 stosuje się tylko do *powierzchni obrotowych* i krzywych zdefiniowanych szkicem 2D. Owinięcie na powierzchni walcowej lub stożkowej realizowane jest tak, jak gdyby owijało się na niej kartkę ze szkicem. Owinięty na tych powierzchniach szkic nie jest zniekształcony² w tym sensie, że długości linii szkicu i ich obrazów są sobie równe. Stosownie do tego na rys.12 zachodzą równości krzywych $OA = OA'$ i $SA = SA'$.


Owijanie szkicu na innych powierzchniach obrotowych jak np. na kuli powoduje pewne zniekształcenia. Na przykład owijanie na kuli odbywa się tak, że płaszczyzna szkicu jest układana najpierw wzdłuż tworzącej bryły (krawędzi, która podczas tworzenia bryły jest obracana wokół osi) a następnie odcinki prostopadłe do linii styku są owijane na kołach powierzchni wyznaczonych przez jej przecięcie płaszczyznami prostopadłymi do osi obrotu. Zatem odcinki $OS = OS'$ (ułożenie wzdłuż tworzącej) i $AS = A'S'$ oraz $BS = B'S'$, ale już $OA \neq OA'$.

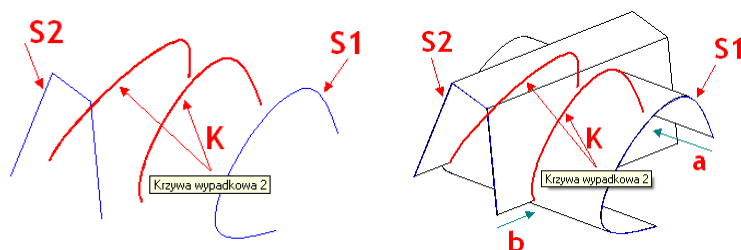


Rys.12. Owijanie prostokąta na stożku i kuli

Polecenie wykonuje się w dwóch prostych krokach. Krok **1** to wybór powierzchni, na której będzie owinięty szkic oraz krok **2** wybór szkicu do owinięcia. Wymogiem polecenia jest to, aby *płaszczyzna, na której jest narysowany szkic była styczna do powierzchni*. Zatem musi być utworzona, jako **Płaszczyzna styczna**.

Krzywa wypadkowa

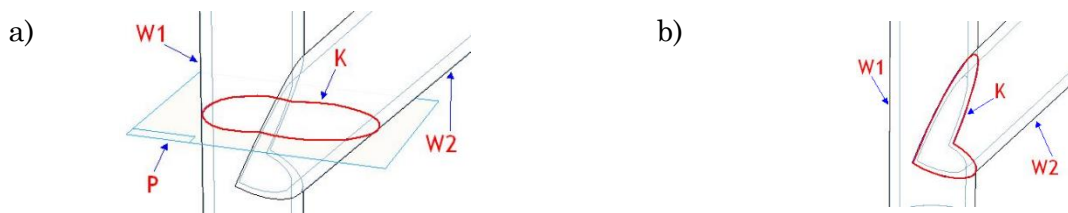
Polecenie  **Wypadkowa** rys. 13. tworzy krzywą przestrzenną na bazie dwóch zestawów krzywych należących do dwóch osobnych szkiców. Wykonuje się je w dwóch krokach i w każdym z nich wskazuje się lub rysuje szkice składowe. W kroku pierwszym wskazuje się pierwszy zbiór krzywych a w drugim drugi zbiór. Powstała krzywa jest krzywą przenikania dwóch hipotetycznych powierzchni walcowych uzyskanych przez wyciągnięcie każdego ze zbiorów krzywych wzdłuż normalnych do ich płaszczyzn. Zasadę tworzenia ilustruje lewa część rysunku.



Rys.13. Krzywa wypadkowa K powstaje z dwóch szkiców $S1$ i $S2$. Prawy rysunek wyjaśnia sposób jej powstawania, jako krzywej przenikania powierzchni walcowych, których kierownicami są krzywe $S1$ i $S2$. Przesuwając je w kierunkach a i b tworzy się powierzchnie walcowe.

² Wynika to z faktu, że powierzchnię walcową lub stożkową można otrzymać wprost zwijając kartkę w rulon lub różek.

Polecenie to jest przydatne kiedy trzeba utworzyć krzywą przestrzenną na podstawie znajomości jej rzutów prostopadłych.



Rys.14. Działanie poleceń a) **Przenikanie** oraz b) **Pochodna**

Krzywa przenikania

Polecenie **Przenikanie** tworzy krzywą przenikania pomiędzy dwoma zestawami płaszczyzn, lic lub obiektów. Na rys. 14.a pokazano krzywą przenikania pomiędzy płaszczyzną P (zestaw 1) a walcami $W1$ i $W2$ (zestaw 2) tworzącymi boczne ściany trójkąta. Polecenie to w zastosowaniu do ścian walcowych $W1$ (zestaw 1) oraz $W2$ (zestaw 2) wygeneruje krzywą K jak na rysunku 14.b. Wykonuje się je dwukrotnie a każdym z nich wskazanie się kolejny zestawu powierzchni do przecięcia.

Krzywa pochodna

Polecenie **Pochodna** tworzy nową krzywą pokrywającą się z wybranymi elementami liniowymi, którymi mogą być krawędzie brył i powierzchni konstrukcyjnych lub elementy szkiców. Jeżeli wszystkie krzywe lub krawędzie wejściowe są połączone końcami, krzywa pochodna może być pojedynczą krzywą B-sklejaną. Jeżeli krzywe wejściowe są połączone, ale nie styczne, do tworzonej krzywej pochodnej dodane zostaną niewielkie krzywizny, tak aby w wyniku powstała gładka krzywa sklejana.

Polecenie posiada tylko jeden krok, w którym należy wskazać elementy liniowe. Jeżeli wskazane linie łączą się ze sobą i są w punktach łączenia do siebie styczne, to przyciskiem **Krzywa pojedyncza** można utworzyć jedną krzywą zamiast kilku osobnych.

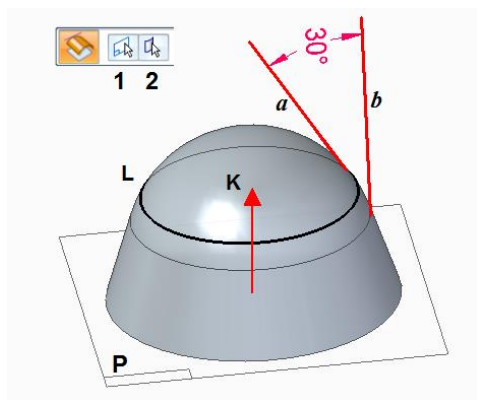
Krzywą K z rysunku 14.b. można alternatywnie utworzyć poleceniem **Pochodna** wskazując na krawędzie obiektu będące wynikiem przenikania walców $W1$ i $W2$. P

Izoklina

Polecenie **Izoklina** (rys.15) umożliwi umieszczenie linii zwanej izokliną³ na co najmniej jednym wybranym licu. Program SE definiuje izoklinę, jako krzywą łączącą punkty powierzchni, w których płaszczyzna styczna (lub normalna) do powierzchni tworzy stały kąt względem wektora \mathbf{K} normalnego do wybranej płaszczyzny P .


Wymagane dane wejściowe to: płaszczyzna odniesienia P , obiekt powierzchniowy i kąt. Krok pierwszy **1** polecenia polega na wskazaniu płaszczyzny odniesienia, krok drugi **2** na wskazaniu obiektu i podaniu kąta oraz kierunku wektora \mathbf{K} . Powstała krzywa może nie być ciągłą.

³ Formalna definicja izokliny mówi, że jest to linia na mapie magnetycznej łącząca punkty o jednakowej inklinacji magnetycznej. W matematyce jest to termin z działy równań różniczkowych. Izokliną równania $y' = f(x, y)$ nazywa się linię o równaniu $f(x, y) = a$, gdzie a jest stałą należącą do zbioru wartości funkcji f .



Rys.15. Izoklina. Styczna do obiektu w punkcie izokliny tworzy ustalony kąt względem kierunku *K* zadanego płaszczyzną.

Linia śrubowa



W SE istnieje specjalne polecenie służące do tworzenia linii śrubowej, tzw. helisy o nazwie  **Krzywa śrubowa** z karty Powierzchnie (sekcja Krzywe). Polecenie to pozwala utworzyć linię śrubową o stałym lub zmiennym skoku, złożoną z sekcji o różnych parametrach (średnicy i skoku) oraz zwykłą spiralę Archimedesesa. Połączenie poleceń **Krzywa śrubowa** oraz **Po krzywej** jest alternatywą dla poleceń wyciągania i wycinania śrubowego. Jednakże polecenia te nie dają identycznych efektów zwłaszcza przy dużym skoku i w tym zakresie wersja oparta o linię śrubową jest lepsza. Jeśli jest np. potrzeba zamodelowania zwiniętego spiralnie drutu, to lepiej to zrobić poleceniami **Krzywa śrubowa** i **Po krzywej**, a nie **Element śrubowy**. Linie śrubową można (ważne w przypadku starszych wersji SE) utworzyć poleceniem **Owiń szkie** owijając odcinek wokół lica lub powierzchni cylindrycznej.

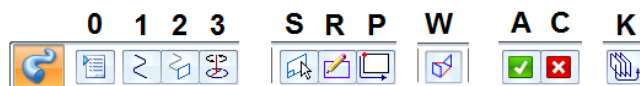
Polecenia tworzenia brył wykorzystujące krzywe

Do poleceń tych zaliczają się polecenia **Po krzywej** i **Przez przekroje** zgromadzone na karcie **Narzędzia główne** w sekcji **Bryły**, w dwóch podgrupach: **Dodaj** – wypełnianie materiałem i **Wytnij** – usuwanie materiału. Oba mają charakter uniwersalny, tzn. mogą zastąpić poznane wcześniej polecenia wyciągania/wycinania, gdyż odpowiednio dobierając profile i ścieżki, da się przy ich pomocy uzyskać te same efekty.

Uwaga! te polecenia mogą nie utworzyć brył, jeśli dane, czyli kształty lub rozmiary krzywych będą niewłaściwie dobrane np. powodując samoprzecinające się zagięcia lic. Z tego względu wszystkie krzywe lepiej jest tworzyć jako obiekty globalne, gdyż to ułatwia edycję bryły za pośrednictwem dynamicznej edycji jej krzywych.

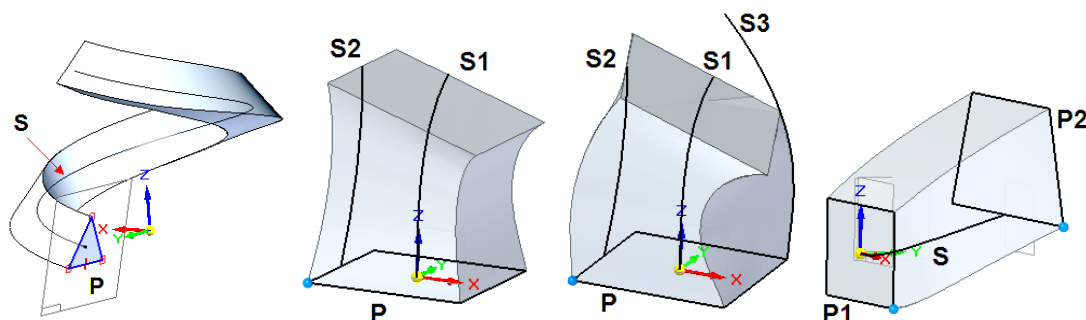
Po krzywej

Polecenia  **Wyciągnięcie** /  **Wycięcie po krzywej** (rys.16.) są uogólnieniem wyciągnięcia/wycięcia prostego, obrotowego oraz spiralnego i pozwalają wyciągnąć dowolny przekrój po dowolnej krzywej zwanej ścieżką.



Rys. 16. Polecenie **Wyciągnięcie po krzywej**. 1 – wybór ścieżki; 2 – wybór profili; 3 – wybór osi skręcenia. S, R – wybór, rysowanie szkicu (na etapach wyboru ścieżki lub profilu); P – zdefiniowanie punktów początkowych na przekrojach; K – ustalenie kolejności przekrojów (czynny w trybie edycji polecenia).

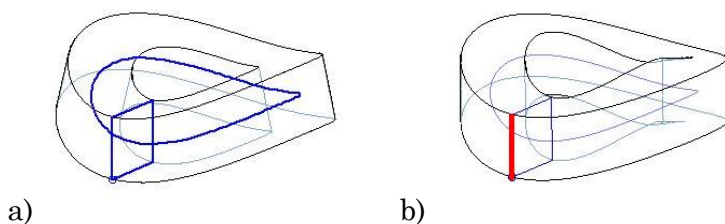
Można użyć *maksymalnie do trzech ścieżek* a każda musi stanowić ciągły zbiór stycznych elementów lub krawędzi. Ścieżki mogą być zamknięte (rys.18). To polecenie może być wykorzystywane do modelowania elementów, w których materiał wypełnia przestrzeń wzdłuż dowolnej krzywej np. elementów giętych z drutu, przewodów rurowych uchwytów itp.



Rys.17. Polecenie **Wyciągnięcie po krzywej** sposoby realizacji. Od lewej: pojedynczy profil i ścieżka następnie wiele ścieżek i profili: profil i dwie ścieżki, profil i trzy ścieżki, dwa profile i ścieżka. P_n – profile, S_n – ścieżki.

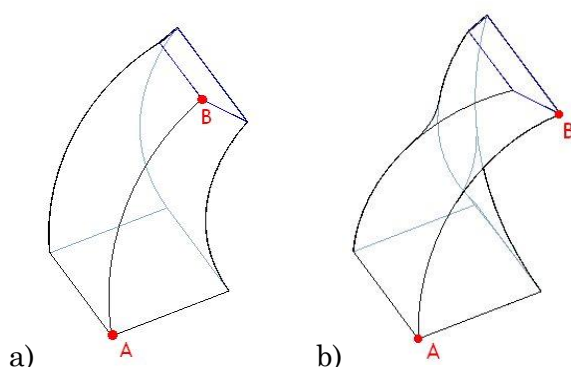
Są dwie wersje wykonania tego polecenia wybierane w opcjach (przycisk **0**). Wersja pierwsza **Pojedyncza ścieżka i przekrój**, polega to na utworzeniu bryły przez przesunięcie jednego profilu, wybranego w kroku **2**, wzdłuż jednej ścieżki wybranej w kroku **1**. Zarówno ścieżka jak i profil mogą być dowolnymi krzywymi (tzn. niekoniecznie planarnymi), zaś profil musi stanowić pętlę. Profil w czasie przesuwania jest obracany tak, by utrzymać tą samą orientację względem płaszczyzny normalnej do krzywej w danym punkcie rys.18a. Jednakże w opcjach polecenia można w grupie Skręcenie wymusić równomierny obrót, a w grupie Skala sposób i parametry liniowego skalowania przeciąganego profilu wzdłuż ścieżki. To pozwala na tworzenie brył o liniowo zmiennym przekroju.

Trzeci krok (zwykle pomijany), to zdefiniowanie osi skręcenia przekroju, którą może być element prostoliniowy. W tym przypadku przy przesuwaniu profilu wzdłuż krzywej jego płaszczyzna ulega obrotowi tak, by była ona cały czas równoległa do osi skręcenia, a kąty między płaszczyzną normalną do osi skręcenia a krawędziami przekroju pozostawały niezmiennie w czasie przesuwania. Niestety efekt końcowy jest zwykle trudny do przewidzenia z wyjątkiem przypadku, gdy oś jest równoległa do normalnej do ścieżki. Ten krok przewidziano dla wyciągania po ścieżkach nieplanarnych. Dla takich ścieżek – bez wyboru osi skręcenia – profil w czasie przesuwania wzdłuż krzywej ulega obrotowi wokół stycznej do ścieżki, tak by utrzymać niezmienną relację geometryczną z płaszczyzną normalną do ścieżki. Jeżeli oś skręcenia będzie równoległa do normalnej do krzywej, to obrót ten nie jest wykonywany, w efekcie wszystkie krawędzie przekrojów, które były równoległe do osi skręcenia pozostają nadal równoległe. Różnice pokazuje rys.18.



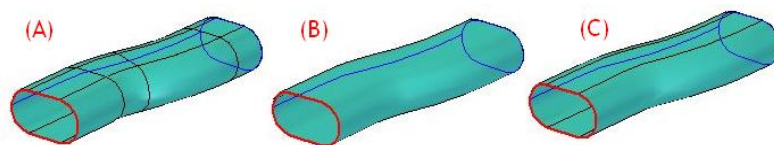
Rys. 18. Efekt użycia kroku wyboru osi skręcenia dla wyciągnięcia przekroju kwadratowego po krzywej nieplanarnej. (a) – bez skręcenia; (b) – ze skręceniem względem pogrubionej krawędzi profilu.

Druga wersja polecenia, to **Wiele ścieżek i przekrojów**. W tym przypadku należy pamiętać, że przejście z kroku **1** do **2** wymaga wciśnięcia przycisku **Dalej** (chyba, że wybrano już 3 ścieżki), zaś zakończenia kroku **2** przycisku **Podgląd**. Ponadto w kroku **1** zatwierdzenie kolejnej ścieżki dokonuje się PPM, ENTER lub przyciskiem **A** w pasku polecenia (rys.16).



Rys. 19. Przyporządkowanie wierzchołków między przekrojami wpływa na skręcenie bryły. Zmieniając przyporządkowanie można dodać nowe pary łączenia wierzchołków.



W tej wersji wskazywanie przekrojów w kroku **2** jest połączone z tzw. przyporządkowaniem wierzchołków, jeżeli profile są rysowane krzywymi posiadającymi wyraźnie wyróżnione wierzchołki. Polega to na tym, że wskazując profil wskazujemy jednocześnie wierzchołek początkowy profilu. W takim przypadku łączenie profili rozpoczyna się od wskazanych punktów. Zmianę przyporządkowania oraz dodanie nowych par wykonuje się na zakończeniu polecenia przyciskiem **W** rys.16.




Rys.20. Działanie parametru łączenie lic. A – brak łączenia (powstają krawędzie wzdłużne i obwodowe przy każdym zmianie krzywizny ścieżki wyciągnięcia); B – pełne (brak krawędzi pozornych) i C – wzdłuż ścieżki (tylko krawędzie podłużne).

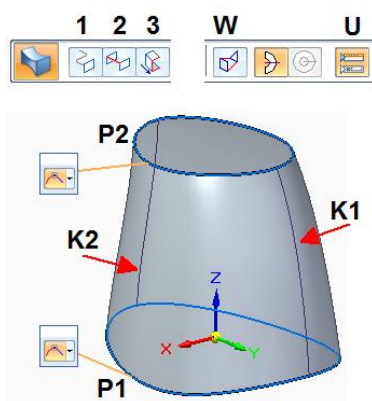
W opcjach polecenia grupa parametrów **łączenie lic** definiuje zasadę tworzenia krawędzi pozornych (takich, w których nie następuje skokowa zmiana krzywizny) rys. 20.

Przez przekroje

Polecenia  **Wyciągnięcie** /  **Wycięcie przez przekroje** umożliwiają zbudowanie brył o nieregularnych kształtach takich jak np. skrzydła samolotowe; łopatki turbin, śmigieł oraz każdego innego, na podstawie znajomości szeregu jego profili, powstałych w wyniku przecięcia bryły płaszczyznami lub ogólnie powierzchniami. Profile mogą leżeć w płaszczyznach dowolnie zorientowanych. Realizuje się je w trzech krokach (rys.21.), przy czym tylko

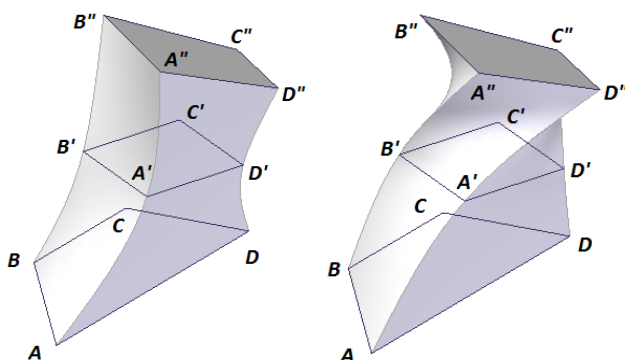
krok 1 jest wykonywany, a po nim polecenie przechodzi od razu do fazy końcowej. Kroki 2 i 3 wykonywane są na życzenie po kliknięciu w odpowiedni przycisk.

Krok 1 –  **przekrój** – trzeba wybrać już istniejące profile lub narysować, co najmniej dwa zamknięte profile. Do rysowania profili używa się kroków wyboru płaszczyzny, na której będzie umieszczony profil i użyciu środowiska szkicowania dokładnie tak jak przy rysowaniu szkicu. Skutkiem działania polecenia jest utworzenie bryły (rys.22.) o powierzchni bocznej składającej się z szeregu płatów rozpiętych między segmentami profili a krzywymi powstałymi z połączenia wierzchołków kolejnych przekrojów krzywymi B-sklejnymi (np. płat $AB'A'D$ prawa bryła). Podstawy bryły są określone profilami końcowymi ($P1$, $P2$). W roli profilu można użyć punktu należy wówczas podczas wskazywania szkiców wybrać z listy Wybierz pozycję Punkt.




Rys.21. Pasek polecenia i wykonanie. W kroku 1 wskazuje się dwa profile w punktach zaznaczonych na rysunku. W kroku 2 można wskazać krzywą wzdłuż, której nastąpi wyciągnięcie. W kroku 3 można wybrać sposób zakończenia wyciągnięcia.

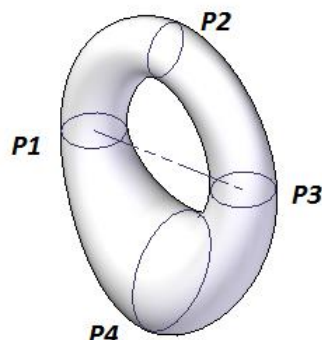
Istotne dla kształtu brył jest przyporządkowanie wierzchołków. Dokonuje się je w pierwszym kroku podczas wskazywania profili. Jeżeli profile te posiadają wyraźnie zaznaczony co najmniej jeden wierzchołek, to wskazywaniu szkicu towarzyszy wyróżnienie wierzchołka, który będzie początkowym punktem przyporządkowania. Dodatkowo program pokazuje (zieloną linią), jak będzie przebiegać krzywa łącząca. Ewentualne modyfikacje przyporządkowania inicjuje się przyciskiem **Edytuj**, potem przyciskiem **Zdefiniuj punkt początkowy** przechodzi się do wyboru nowych punktów początkowych na profilach. Efekty można zobaczyć po użyciu przycisku **Podgląd**.



Rys. 22. Tworzenia bryły wyciągnięciem przez przekroje z różnym sposobem przyporządkowania wierzchołków. Przekroje są odpowiednio czworokątami $ABCD$, $A'B'C'D'$ oraz $A''B''C''D''$. Powierzchnia boczna w obu przypadkach składa się z części rozpiętych między segmentami profili

Krok 2 –  **krzywa wiodąca** – daje możliwość wybrania krzywych wiodących elementu. Krzywe wiodące jak np. $K1$ i $K2$ na rys.21. stanowią element kształtujący powierzchnię boczną. W roli krzywej wiodącej może wystąpić linia ze szkicu, krawędź sąsiadującej powierzchni lub krzywa rzutowana na powierzchnię. Krzywe wiodące muszą przechodzić

przez punkty profili. Stanowią one uzupełnienie krzywych B-sklejanych wynikłych z przyporządkowania wierzchołków.



Rys.23. Wyciągnięcie przez przekroje *P1*, *P2*, *P3*, *P4* wykonana z opcją **Rozciągnięcie zamknięte**.

Krok 3 – **rozcągnięcie** – daje dodatkowe możliwości takie jak: **Rozciągnięcie zamknięte** powodujące – połączenie ostatniego przekroju z pierwszym (przeciwieństwo do **Rozciągnięcia skończonego**) oraz **Przyporządkowanie wierzchołków** – zmiana ustalonego w kroku 1 przyporządkowania wierzchołków lub dodanie nowych zestawów pozwalając na bardziej wyrafinowane kształtowanie bryły. W tym kroku można też korzystając z pływających pałków ustalić warunki styczności lic bocznych do przekrojów końcowych.

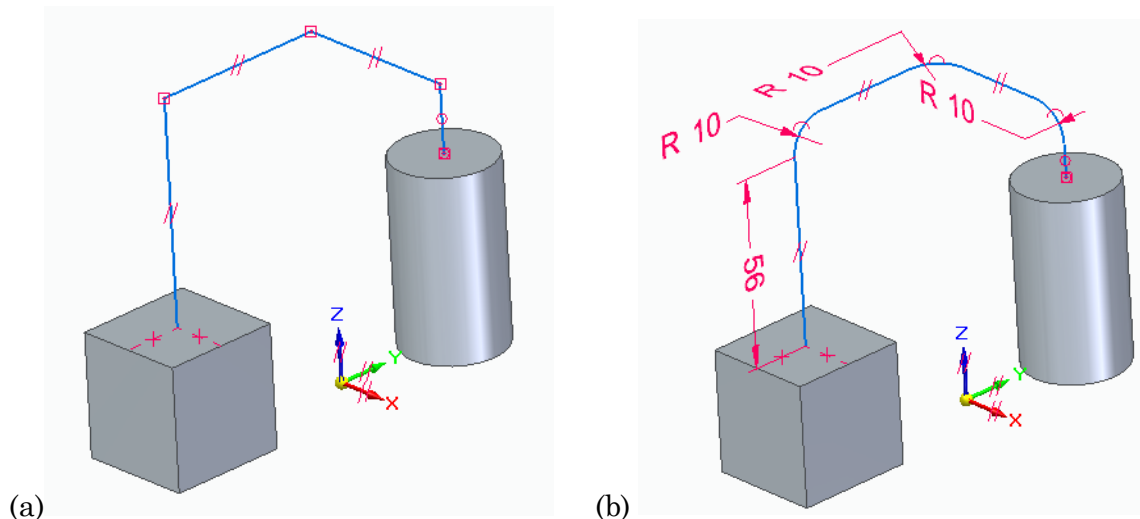
Aby do utworzonej bryły dodać nowy przekrój, trzeba wywołać edycję definicji operacji, następnie kliknąć przycisk **przekrój**, potem kliknąć przycisk **szkic**, a później albo wybrać nowy przekrój, jeśli jest już narysowany (pozycja **Wybierz ze szkicu/Krawędzie części**), albo narysować nowy. Proces kończy akceptacja. Nowy przekrój umieszczany jest na końcu listy przyporządkowań wierzchołków i jeżeli znajduje się on między innymi przekrojami, to może zostać wygenerowany błąd. W takim wypadku zaraz po akceptacji przekroju, należy dodatkowo kliknąć przycisk **Edytuj**, następnie kliknąć przycisk **Kolejność przekrojów**. Po tem w oknie dialogowym zaznaczyć dodany przekrój i przyciskami **W górę**, **W dół** przesunąć go na właściwe miejsce. Jeśli po dodaniu przekroju został wciśnięty przycisk **Pogląd**, po którym został zgłoszony błąd, to należy zamknąć okno komunikatu przyciskiem **Edytuj**, potem powtórnie kliknąć przycisk **przekrój**, a następnie poprawić kolejność przekrojów.

Aby w utworzonej bryle usunąć profil przekroju, trzeba wywołać edycję definicji operacji, następnie kliknąć przycisk **przekrój**, potem kliknąć w linię usuwanego przekroju z przytrzymanym klawiszem CTRL.

Zadania – elementy liniowe

Zad. 1.

Wykonaj w dowolnym środowisku dwa wyciągnięcia tworzące oddzielne bryły: prostopadłościan i walec.



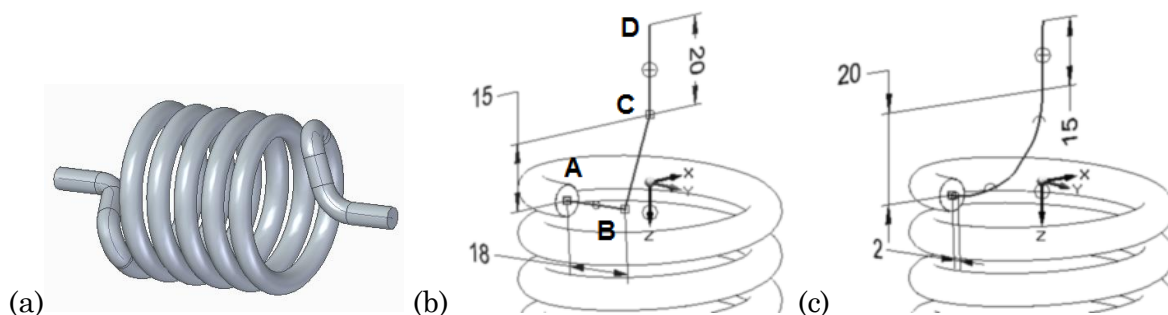
Rys. Z-1.

1. Utwórz szkic 3D łączący środki walca i lica górnego łamaną jak na rys. Z-1a.
2. Następnie zaokrąglij narożniki jak na rys. Z-1b.
3. Użyj odpowiednich relacji i wstaw wymiary. Ukryj wykonany szkic 3D.
4. Utwórz nowy szkic 3D i zrób to samo korzystając z polecenia **Routing Path**.

To polecenie służy do automatycznego utworzenia łamanej łączącej dwa wybrane punkty (obserwuj pasek podpowiedzi). Po wskazaniu punktów wybierz wersję połączenia klikając w przyciski (**Poprzednia** lub **Następna**). Zakończ zatwierdzając klawiszem ENTER, PPM lub przyciskiem **Akceptuj**.


Zad. 2.

Wykonaj spiralę pokazaną na rys. Z-2. Użyj do tego celu poleceń **Krzywa śrubowa**, **Po krzywej** oraz szkiców 3D.



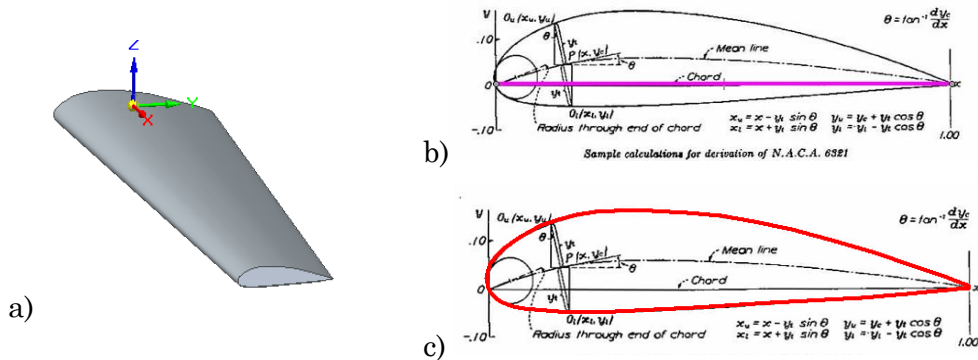
Rys. Z-2

1. Wykonaj linię śrubową wzdłuż osi Z. Wymiary: $\varnothing 50$, skok 10 mm, liczba zwojów 5,5.
2. Wyciągnij (**Po krzywej**) wzdłuż niej koło $\varnothing 7$ – środek koła pokrywa się z początkiem spirali. Szkic koła do wyciągnięcia wykonaj na pł. normalnej do krzywej (pozycja 0).
3. Utwórz szkic 3D jak na rys. Z-2b. Odcinek AB ma być współosiowy z okręgiem stanowiącym lico końcowe spirali (przy prowadzeniu linii przy kursorze ma się pojawić ikona). Odcinek CD ma być współliniowy z osią Z (użyj relacji).

- Wstaw wymiary jak na rys. (b) $AB = 18\text{ mm}$, $CD = 20\text{ mm}$. Wymiar $AC = 15\text{ mm}$ (**Odległość pomiędzy**) załóż blokując pł. XZ (lub YZ w zależności jak jest utworzona spirala) – przycisk  **Zablokuj płaszczyznę wymiaru** w pasku wymiarowania (odblokowanie klawiszem F3).
 - Zaokrąglaj narożniki B i C promieniami odpowiednio R8 i R12 a potem skoryguj wymiary tak by miały wartości jak na rys. Z-2c. Odcinek BC powinien się „skurczyć” do niewielkich rozmiarów np. 2 mm.
 - Poleceniem **Po krzywej** (jak poprzednio) wyciągnij koło wzdłuż utworzonej ścieżki 3D. Nie rysuj koła tylko rzutuj (**Rzutuj do szkicu**) zarys lica końcowego spirali. Jeżeli są kłopoty z prowadzeniem szkicu ułatwieniem może być umieszczenie w punkcie A pomocniczego ukl. współrzędnych.
- Powtórz to samo dla drugiego końca spirali.

Zad. 3.

Zadanie polega na wykonaniu modelu skrzydła samolotowego w oparciu o rzeczywisty rysunek profilu z użyciem krzywych jak na rys. Z-3a.



Rys. Z-3.

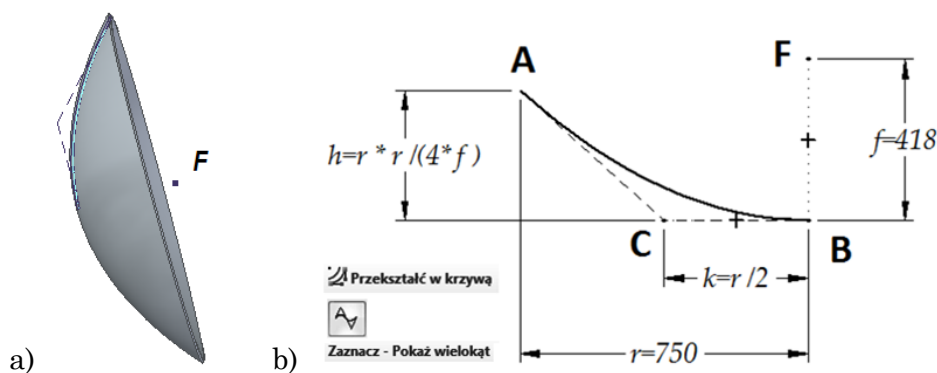
- Utwórz nowy projekt w module Rysunek (ISO metryczne). Wyświetl i przejdź na zakładkę **Model 2D**.
- Wywołaj polecenie Narzędzia główne | Wstawianie → **Obraz** i wstaw plik **Profil do modelowania.jpg** – obraz zawiera profil lotniczy z tabelą.
- Narysuj na tle obrazu pomocniczą linię rozciągającą się od krawędzi natarcia do krawędzi spływu profilu jak na rys. Z-3b.
- Zaznacz linię i z pola Długość skopiuj do schowka wartość długości (bez jednostki).
- Wywołaj polecenie **Skala**, zaznacz całość. Jako środek skali wskaż jeden z końców odcinka. W polu Skala: wpisz **700/wklejona_wartość_ze_schowka** i wciśnij ENTER. W ten sposób przeskaluje się rysunek tak, by profil miał długość 700 mm. Po przeskalowaniu linię pomocniczą można usunąć.
- Za pomocą polecenia **Krzywa** obrysuj profil z opcją Zamknij krzywą rys. Z-3c. Ewentualne błędy skoryguj edytując jej punkty sterujące oraz edycji. W czasie rysowania więcej punktów powinno być w miejscach największych krzywizn tzn. na nosie i przy krawędzi spływu.
- Wywołaj polecenie Narzędzia | Pomoce → **Utwórz 3D**. Wypełnij pola w oknie dialogowym. Opcja: Dodaj do nowego pliku, zastosuj szablon **iso metric part.par** (przycisk **Przełączaj**). Kliknij **Dalej** potem z listy Orientacja widoku wybierz Widok z prawej (czyli wzdłuż osi X). Kliknij na widoczne na ekranie utworzone linie obrysu (bez pomocniczej linii służącej do skalowania) i wciśnij **Zakończ**.
- Po przejściu do modułu Część na jednej z płaszczyzn głównych (powinna to być YZ) będzie widoczny profil wstawiony jako Szkic z przodu. Na jednej z pł. prostopadłych do wstawionego szkicu np. XY utwórz nowy szkic (poleceniem **Szkic**), w którym narysuj tylko linię prostopadłą do wstawionego szkicu o długości 3000 mm. Zamknij szkic.

9. Teraz wywołaj polecenie (Wyciągnięcie) **Po krzywej**. W opcjach ustaw Pojedyncza ścieżka i przekrój. Wskaż najpierw dorysowaną linię (w polu Opcje Twórz-Od ma być wybrana opcja Wybierz ze szkicu/...) i zatwierdź (np. ENTER). Potem wskaż wstawiony profil. Przed wciśnięciem **Zakończ** wróć od opcji i w grupie Skala aktywuj skalowanie wpisując jako skale początkowa **1** i końcową **0,6**.

W ten sposób powstało zwężające się skrzydło samolotowe w oparciu o profil NACA, bez konieczności żmudnego wklepywania współrzędnych punktów węzłowych profilu. Punkty 2 – 6 można wykonać bezpośrednio w module Część, tworząc od razu szkic, w którym będzie wstawiony obraz oraz obrys profilu i wówczas punkt 7 może zostać pominięty. Oczywiście utworzony szkic trzeba będzie ukryć.

Zad. 4.

Zadanie polega na wykonaniu lustra parabolicznego o zadanym promieniu r i ogniskowej f (rys. Z- 4a)



Rys. Z- 4.

1. Wywołaj polecenie **Szkic**.
2. Narysuj ukośnie odcinek AB . Punkt B ma się pokrywać z początkiem układu współrzędnych rys. Z- 4b.
3. Poleceniem **Przekształć w krzywą** przekształć odcinek w splajn. W ten sposób tworzy się splajn oparty na 2 punktach edycji (3 punktach kontrolnych A , B i C), który będzie krzywą stopnia 2. Trik polega na pominięciu polecenia **Krzywa**, którym można utworzyć splajn oparty na minimum 3 punktach edycji (4 punktach kontrolnych), co dałoby krzywą stopnia 3 a nie 2.
4. Zaznacz otrzymany splajn, przesun w dół jego środkowy uchwyt C a w pasku polecenia uaktywnij opcję **Pokaż wielokąt** (to włączy widoczność linii AC i CB i ułatwi wymiarowanie) – od tego momentu splajn jest już parabolą, ale o nieznanym parametrach.
5. Poleceniem **Punkt** (sekcja Rysuj w tej samej grupie co **Linia**) narysuj punkt F .
6. Załóż relację poziomości między punktem B i C oraz pionowości między F i B .
7. Poleceniem **Odległość między** (orientacja **Poziomo/Pionowo**) załóż więzy wymiarowe jak pokazano to na rys. Z- 4b między punktami $AC = h$ (wysokość lustra), $AB = r$ (promień lustra), $FB = f$ (ogniskowa paraboli) oraz $CB = k$.
8. Poleceniem Narzędzia | Zmienne \rightarrow Zmienne nadaj wymiarom zasugerowane nazwy (h , r , f , k) a potem załóż więzy algebraiczne na wymiary h i k zgodnie z zamieszczonymi na rys. wzorami.

Ostatecznie wynikiem operacji 3–7 jest parabola, której wierzchołek znajduje się w punkcie B , o zadanej ogniskowej f i szerokości gałęzi r (czyli zakresu x w równaniu⁴ $y = ax^2$).

⁴ Zgodnie z geometrią analityczną $a = 1/(4f)$

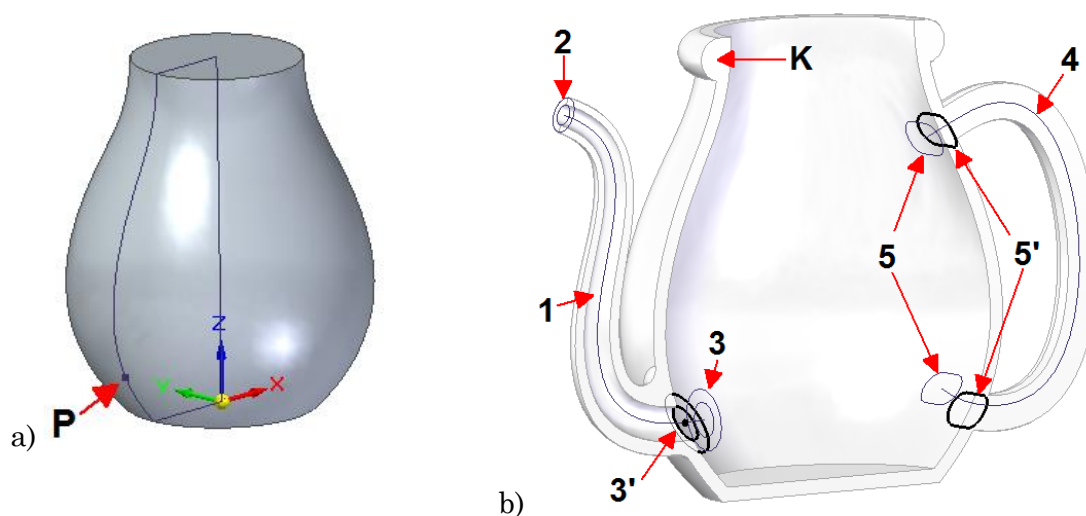
Późniejszy jej obrót wokół FB pozwoli uzyskać paraboloidę obrotową o promieniu r stanowiącą powierzchnię lustra parabolicznego.

9. Teraz będąc jeszcze w szkicu dorysuj (poleceniem **Odsunięcie**) krzywą równoległą do paraboli i zrób z całości zamkniętą pętlę dorysowując na końcach zamykające odcinki. Odcinek przy B zostanie użyty jako oś obrotu. Niestety odsunięta krzywa będzie splajnem nie skojarzonym z narysowaną parabolą. Dlatego przy ewentualnych zmianach parametrów paraboli trzeba będzie ją skasować i utworzyć na nowo. Zamknij szkic.
10. Na koniec wywołaj polecenie **Obróć** i wykonaj paraboloidę stanowiącą lustro.

Zad. 5.

Korzystając z krzywych skonstruować model dzbana o wys. ok. 250 mm. Resztę wymiarów dobrać wg uznania. Ułatwieniem w konstrukcji będzie korzystanie ze szkiców globalnych. Wykonanie pokazuje rys. Z– 5.

△ Bezwzględnie dodawać do każdego szkicu więzy wymiarowe.



Rys. Z– 5.

1. Należy wyjść od profilu pokazanego na (a). Zakrzywiona linia prowadzona jest poleceniem **Krzywa** reszta **Linie**. Dodatkowo umieścić na krzywej punkt **P** (będzie potrzebny do prowadzenia osi dziubka **1**). Wykonać bryłę obrotową. Będzie ona modelem wnętrza dzbana. Na tym etapie można przypisać do bryły materiał i poleceniem (Kontrola) → **Właściwości** obliczyć jej objętość. Pokazana objętość będzie objętością dzbana.
2. Bryłę (a) należy przekształcić poleceniem **Bryła cienkościenna** (z otwartym górnym litem) na dzban jak na (b) wykonując **pogrubienie na zewnątrz**. Potem poleceniem **Obróć** dodać górny **K** kołnierz będący częścią torusa.
3. Na osobnym szkicu (b) umieścić linię **1** (splajn) reprezentującą oś dziubka. Linia powinna przechodzić przez punkt **P** i wchodzić z zapasem do wnętrza dzbana.
4. Na obu końcach osi **1** utworzyć dwa osobne szkice **2** i **3** na płaszczyznach normalnych do krzywej (pozycje: 0 i 1). Szkic **2** jest przeznaczony na zarys wylotu (dwa okręgi jeden na lico zewnętrzne dziubka a drugi mniejszy na lico kanału). Drugi szkic **3** (dwa okręgi) na zarys wlotu. Ten szkic będzie znajdował się we wnętrzu dzbana. Należy pilnować, aby linie szkicu **3** nie dotykały wewnętrznego lica dzbana. Jeśli tak się zdarzy, to metodą edycji dynamicznej trzeba przesunąć koniec osi **1** w głąb dzbana.
5. Zrzutować szkic wewnętrzny **3** (oba okręgi) poleceniem **Rzutowana** (karta Powierzchnie) na wewnętrzne lico dzbana uzyskując w ten sposób parę krzywych **3'**. Po wykonaniu szkicu **3** należy ukryć.

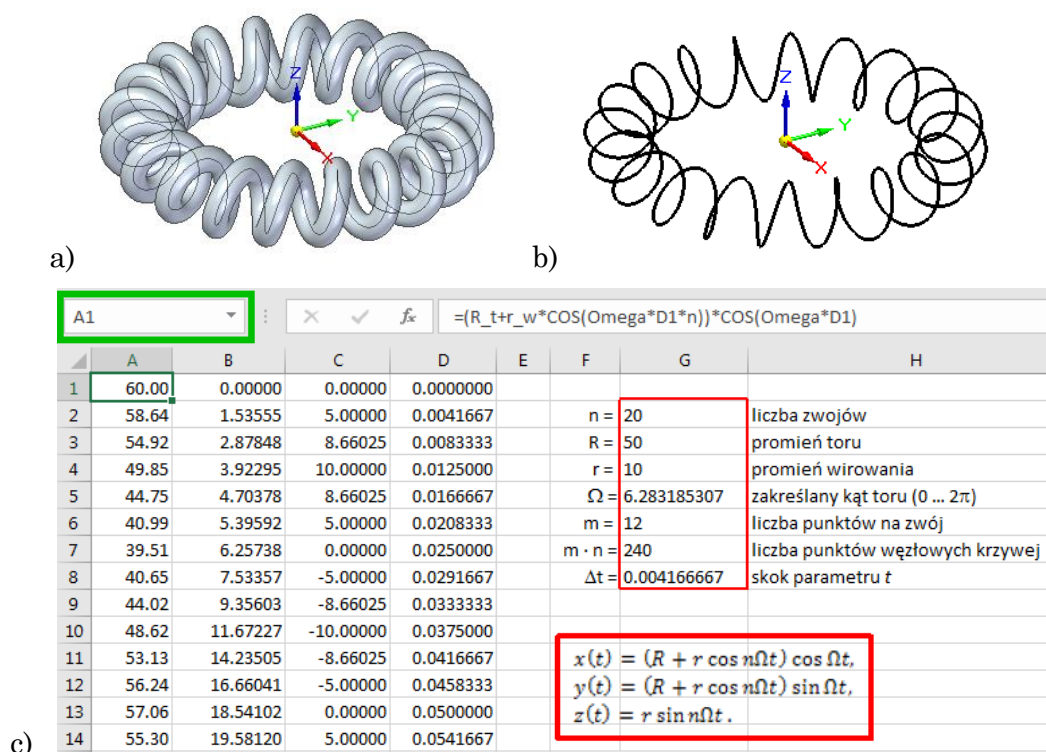
6. Wykonać polecenie **Wyciągnięcie po krzywej** z opcją Wiele ścieżek i przekrojów, wskazując jako ścieżkę oś dziubka **1** (po jej wskazaniu użyć przycisku **Dalej**) a następnie wskazać większe koła ze szkiców **2** i **3**.
7. Powtórzyć to samo, ale stosując polecenie **Wycięcie po krzywej**. Jako profile początkowy i końcowy wskazać mniejsze koła w szkicach **2** i **3**. Tak zostanie utworzony kanał dziubka.
8. Skutkiem wykonanych poleceń będzie dziubek dzbanka. Po jego wykonaniu krawędź łączenia dziubka z licem dzbanka można zaokrąglić.
9. Wykonać analogiczne czynności by ukształtować ucho dzbanka. W tym przypadku konieczne jest tylko jedno wyciągnięcie. Wykonać jeden szkic zawierający oś ucha **4**. Potem na końcach osi dwa szkice **5** zarysu początkowego i końcowego ucha. Powinny być całkowicie wewnątrz dzbanka. Należy pamiętać o odpowiednio głębokim wejściu osi **4** do z obu stron wnętrza dzbanka. Potem poleceniem **Rzutowana** utworzyć krzywe **5'** i ukryć szkice **5**. Reszta jak poprzednio.

Zad. 6.

Zadanie polega na wykonaniu spirali owiniętej na torusie rys. Z– 6. Wykonuje się je w dwóch krokach:

1. Zrobienie ścieżki wyciągnięcia poleceniem **Krzywa według tabeli**.
2. Zrobienie poleceniem **Wyciągnięcie po krzywej** spirali przy użyciu wykonanej ścieżki.

Uwaga! Ćwiczenie wymaga posiadania zainstalowanego MS Excel.



Rys. Z– 6.

Cała tajemnica tkwi w równaniach parametrycznych spiralnej ścieżki, które są podane w grubej ramce rys. Z– 6c. Oznaczenia R – promień torusa, r – promień spirali (promień przekroju poprzecznego torusa), n – liczba zwojów, Ω – kąt pokrycia (owinięcia) torusa $[0, 2\pi]$ (dla spirali jak na rys. Z– 6b. $\Omega = 2\pi$, czyli pełne owinięcie). Arkusz trzeba wypełnić tak by w kolumnach **A, B, C** znalazła się wystarczająca liczba punktów węzłowych ścieżki

pozwalająca na jej gładkie rysowanie, co reguluje liczba m punktów na zwój. Sensowna liczba to $m = 12 \dots 24$. Liczba wszystkich punktów krzywej wynosi $m \cdot n$, a wynikający stąd krok przyrostu parametru t wynosi $\Delta t = 1/(m \cdot n)$ – gdzie $t \in [0; 1]$. Przebieg czynności jest następujący:

1. W nowym dokumencie Część (ISO metryczne) należy wykonać polecenie **Krzywa według tabeli**. W oknie Wstaw obiekt należy zaznaczyć opcję Utwórz nowy arkusz a następnie wypełnić tabelę jak pokazuje to rys. Z– 6c. Kolumna **G** przechowuje parametry do generowania krzywej. W podanym przykładzie komórkom od **G2** do **G5** przypisano następujące nazwy⁵ kolejno: n , R_t , r_w , Ω a komórce **G8** nazwę dt . Nazwy te, dla aktywnej komórki, nadaje się w polu nazwy znajdującym się obok paska formuł (zielona ramka, lewy górny narożnik) a ich zarządzanie w oknie wywołanym skrótem CTRL–F3 (**Menedżer nazw**).

Najpierw należy wypełnić kolumnę **G** (cienka czerwona ramka). Do komórek **G2:G6** wpisać odpowiednie wartości (użyj danych z rys.). Potem trzeba wpisać formuły:

$$\begin{aligned} \mathbf{G7} &\rightarrow =\mathbf{G2}*\mathbf{G6} \\ \mathbf{G8} &\rightarrow =1/\mathbf{G7} \end{aligned}$$

Potem do komórek **D1, D2** wpisać formuły:

$$\begin{aligned} \mathbf{D1} &\rightarrow = 0 \\ \mathbf{D2} &\rightarrow = \mathbf{D1}+dt \text{ lub } \mathbf{D1}+\mathbf{G8} \end{aligned}$$

Następnie powielić zawartość komórki **D2** przeciągając prawy dolny punkt ramki wyboru w dół kolumny, aż do uzyskania wartości 1, którą po wypełnieniu NALEŻY USUNĄĆ. Kolumna ta służy do przechowywania wartości parametru t występującego w równaniach parametrycznych. Dalej w pierwszym wierszu wpisać formuły:

$$\begin{aligned} \mathbf{A1} &\rightarrow = (\mathbf{R}_t + r_w*\mathbf{COS}(n*\mathbf{Omega}*\mathbf{D1})) * \mathbf{COS}(\mathbf{Omega}*\mathbf{D1}) \\ \mathbf{B1} &\rightarrow = (\mathbf{R}_t + r_w*\mathbf{COS}(n*\mathbf{Omega}*\mathbf{D1})) * \mathbf{SIN}(\mathbf{Omega}*\mathbf{D1}) \\ \mathbf{C1} &\rightarrow = r_w * \mathbf{SIN}(n*\mathbf{Omega}*\mathbf{D1}) \end{aligned}$$

Potem zaznaczyć blok **A1:C1** i powielić jego zawartość ciągnąc za prawy dolny punkt ramki wyboru w dół, aż do zrównania się z ostatnią pozycją kolumny **D**. Kolumny **F** i **H** zawierają tylko teksty komentarza. Można je nie wypełniać, ale dla czytelności lepiej pozostawić przynajmniej kolumnę **F**. Podobnie wzory widoczne na rys. Z– 6c w grubej ramce nie są konieczne. Po wypełnieniu zamknąć arkusz.

2. Po powrocie do SE należy na końcu spirali narysować okrąg np. o promieniu 8 mm i wyciągnąć go wzdłuż wykonanej spirali poleceniem **Wyciągnięcie po krzywej**.

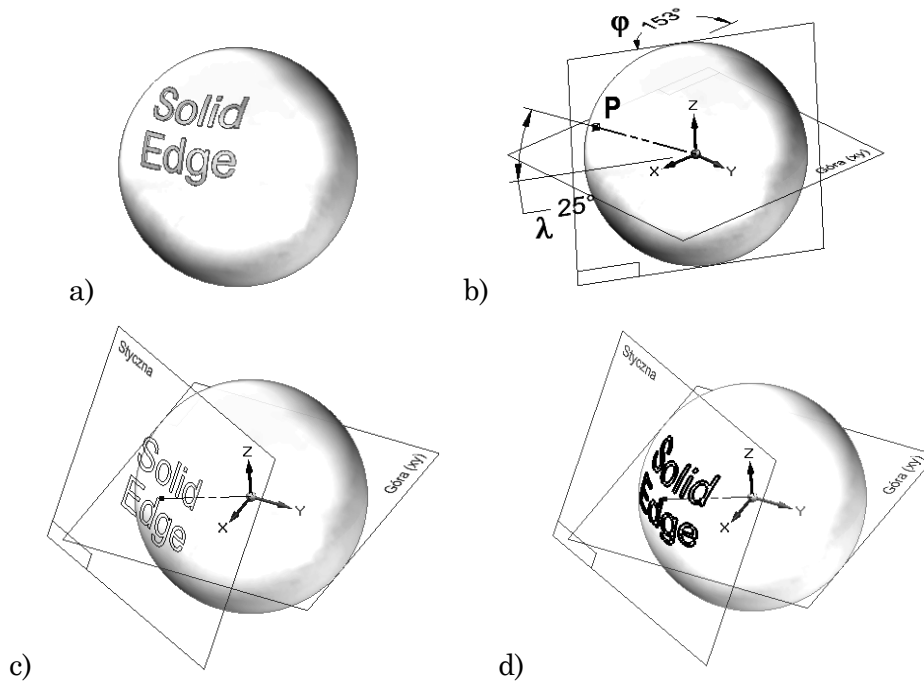
Zad. 7.

Zadanie polega na uwypukleniu (lub wycięciu) napisu na licu kuli rys. Z– 7. Przebieg projektowania jest następujący:

1. Wykonać poleceniem **Obróć** kulę o promieniu 50 mm.
2. Na płaszczyźnie obróconej (kat φ) wokół np. osi Z (lista Opcje Twórz–Od pozycja Płaszczyzna nachylona) wykonać globalny szkic pomocniczy (b) zawierający odcinek łączący krawędź sylwetki kuli (relacja typu **X** Połączenie 1 st. swobody), punkt **P** na rysunku, z początkiem układu współrzędnych. Wstawić wymiar kątowy λ między nią a osią X (lub inną dostępną). Będzie on służył do przemieszczania napisu po licu kuli w kierunku południkowym.
3. Utworzyć płaszczyznę styczną poleceniem **Płaszczyzna styczna** do kuli w punkcie **P**.

⁵ Korzyść z tego jest taka, że formuły stają się czytelne – porównaj czytelność formuły $\mathbf{G5}*\mathbf{SIN}(\mathbf{G5}*\mathbf{D1}*\mathbf{G2})$ z formułą $r_w*\mathbf{SIN}(\mathbf{Omega}*\mathbf{D1}*n)$.

4. Na utworzonej płaszczyźnie wykonać napis jak na (c) – polecenie (Narzędzia | Wstawianie →) **Profil tekstowy**. Napis wykonać fontem Arial rozmiar 25 mm i wycentrować go (relacje Poziomo/Pionowo do ramki tekstu) na punkcie **P**.
5. Poleceniem **Owiń szkic** (karta Powierzchnie) umieścić napis na licu kuli a potem ukryć szkic z napisem oraz szkic pomocniczy.
6. Poleceniem **Wyciągnięcie normalne** (panel Bryły) wykonać uwypuklenie (pamiętaj by wskazać wszystkie linie rzutowanego napisu) na wys. 1 mm i ukryć owinięty napis.
7. Na koniec poleceniem **Malarz części** można pokolorować wyciągnięte lica napisu.



Rys. Z- 7

Napis można przemieszczać modyfikując zmienne: kąt obrotu pł. obróconej φ i wymiar kątowy λ w oknie Tabela zmiennych (polecenie **Zmienne**).

Warianty wykonania zadania:

- (i) Użyj polecenia **Wycięcie normalne** zamiast **Wyciągnięcie normalne** do wycięcia napisu.
- (ii) Do umieszczenia napisu na licu kuli użyj polecenia **Rzutowana** zamiast **Owiń szkic**.

Wszystkie warianty wykonania można w trybie sekwencyjnym zrealizować na tym samym modelu blokując odpowiednie operacje w drzewie **PF**.