

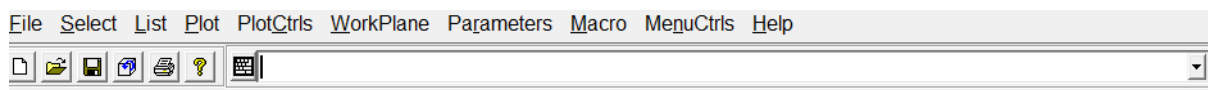
LABORATORIUM NUMERYCZNE MECHANIKI KONSTRUKCJI

Wprowadzenie do języka APDL i parametryzacja konstrukcji

1 Wprowadzenie teoretyczne i składnia języka APDL

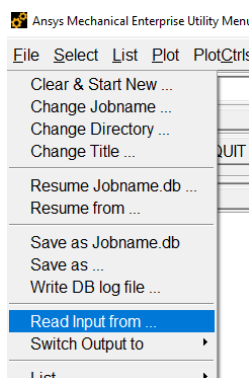
Język APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) jest potężnym narzędziem pozwalającym na pełną automatyzację analiz inżynierskich, parametryzację geometrii, optymalizację konstrukcji oraz implementację niestandardowych algorytmów fizycznych. Graficzny interfejs użytkownika (GUI) programu ANSYS jest jedynie nakładką interpretującą kliknięcia jako sekwencje komend APDL.

Komendy języka APDL mogą być wpisywane w linii poleceń:



Rysunek 1: Linia poleceń głównego okna Ansysa.

lub wczytane z pliku tekstowego:



Rysunek 2: Wczytywanie pliku komend

1.1 Zasady definiowania parametrów i tablic

- Komentarze w kodzie APDL zaczynają się od znaku wykrzyknika (!).
- **Nazewnictwo zmiennych:** Nazwy parametrów muszą zaczynać się od litery, mogą zawierać wyłącznie litery, cyfry oraz znaki podkreślenia (maksymalnie 32 znaki).
- **Przypisanie wartości:** Realizujemy bezpośrednio lub za pomocą jawnej komendy `*SET`:

```
xyz = 5  
*SET, xyz, 5
```

- **Usuwanie parametrów z bazy:** Czyszczenie zmiennej odbywa się komendą *SET bez podawania wartości lub skróconym zapisem z operatorem przypisania:

```
*SET , xyz ,
xyz =
```

- **Tablicowe parametry liczbowe:** Rozmiar deklarujemy poleceniem:
*DIM, nazwa, typ, imax, jmax, kmax, , ,
Najczęściej używa się typu ARRAY (tablica liczb maksymalnie trójwymiarowa). Komórki są indeksowane od 1.

Przykład definicji tablicy 3×2 :

```
*DIM , A , ARRAY , 3 , 2 , , , ,
```

Przykład przypisania wartości do komórek:

```
A (1,1) = 5
A (1,2) = z
*SET , A (2,1) , 6
```

Zapis *SET, A(2,2), a, b jest równoważny sekwencyjnemu przypisaniu:

```
A (2,2) = a
A (3,2) = b
```

1.2 Wyrażenia, funkcje matematyczne i komentarze

System obsługuje standardowe operatory i funkcje matematyczne (Tabela 1). Kąty w funkcjach trygonometrycznych podawane są domyślnie w radianach, a wyniki funkcji odwrotnych również zwracane są w radianach.

Tabela 1: Wybrane operatory i funkcje języka APDL

Operator	Działanie	Funkcja	Opis
+	Dodawanie	ABS(x)	Wartość bezwzględna $ x $
-	Odejmowanie	SQRT(x)	Pierwiastek kwadratowy $\sqrt{x}$
*	Mnożenie	EXP(x)	Funkcja wykładnicza e^x
/	Dzielenie	LOG(x) / LOG10(x)	Logarytm naturalny / dziesiętny
**	Potęgowanie (a^b)	SIN(x) / COS(x) / TAN(x) ASIN(x) / ACOS(x) / ATAN(x)	Funkcje trygonometryczne Funkcje cyklometryczne

1.3 Komendy strukturalne Preprocesora (/PREP7)

- **Wejście do preprocesora:**

```
/PREP7
```

- **Tworzenie punktów (Keypoints):**

```
K, N, X, Y, Z
```

gdzie N to numer keypointsa (kp), X,Y,Z współrzędne.

- **Tworzenie linii prostych:**

```
LSTR, P, K
```

gdzie P to kp początku, K to kp końca.

- **Tworzenie łuków kół:**

```
LARC, P, K, C, R
```

gdzie P to kp początku, K to kp końca, C to kp wskazujący, po której stronie łuku leży jego środek krzywizny, R promień łuku.

- **Tworzenie krzywych typu Spline:**

```
BSPLIN, P1, P2, P3, P4, P5, P6, XV1, YV1, ZV1, XV6, YV6, ZV6
```

gdzie:

P1,P2,P3...P6 to keypointy przez które przechodzi splajn, muszą być przynajmniej 2 podane,

XV1,YV1,ZV1 to współrzędne wektora stycznego do splajna w kp P1,

XV6,YV6,ZV6 to współrzędne wektora stycznego do splajna w kp P6 (lub w ostatnim zdefiniowanym kp).

- **Tworzenie powierzchni z linii:**

```
AL, L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10
```

gdzie:

L1,L2,L3...L10 to linie definiujące powierzchnię, muszą być co najmniej 3.

- **Wybór elementu skończonego:**

```
ET, numer, nazwa
```

gdzie:

numer to numer typu elementu w naszym modelu,

nazwa to nazwa typu elementu np. PLANE182, SOLID185.

- **Definicja właściwości materiałowych:** Najpierw należy zdefiniować tabelę temperatur dla właściwości materiałowych. Jeśli nie mamy zależności właściwości od temperatury powinno to wyglądać tak:

```
MPTEMP, 1, 0
```

Potem następuje właściwa definicja materiału:

```
MPDATA, Lab, MAT, , Val
```

gdzie:

Lab określa jaką właściwość definiujemy, mogą to być np. EX (moduł Younga), PRXY (współczynnik Poissona), ALPX (współczynnik rozszerzalności termicznej), DENS (gęstość).

MAT to numer definiowanego materiału, którego dana właściwość dotyczy

Val wartość definiowanej wielkości

1.4 Instrukcje warunkowe i pętle sterujące

Struktury logiczne umożliwiają sterowanie przebiegiem automatycznej analizy wytrzymałościowej.

Składnia instrukcji warunkowej *IF:

```
*IF, VAL1, Oper, VAL2, THEN
    ! linie wykonywane, jeżeli warunek logiczny jest prawdziwy
*ELSEIF, VAL3, Oper, VAL4
    ! alternatywny warunek, gdy pierwszy okazał się fałszywy
*ELSE
    ! instrukcje wykonywane domyślnie w przeciwnym razie
*ENDIF
```

W konstrukcji *IF system ANSYS obsługuje pełen zestaw operatorów porównania (*Oper*):

- EQ – równy, NE – nierówny.
- LT – mniejszy niż, GT – większy niż.
- LE – mniejszy bądź równy, GE – większy bądź równy.
- ABLT / ABGT – mniejszy / większy przy porównaniu wartości bezwzględnych.

Składnia pętli iteracyjnej *DO oraz pętli warunkowej:

```
*DO, i, min, max, inc
    ! zmienna 'i' zmienia się od min do max z przyrostem inc
*ENDDO

*DOWHILE, kont
    ! pętla wykonywana jest dopóki parametr kont jest większy od zera
*ENDDO
```

1.5 Wydobywanie danych (Cechy *GET i *VGET)

Pobieranie fizycznych i numerycznych parametrów z bazy MES odbywa się automatycznie przy użyciu poleceń ekstrakcji:

```
*GET, dlugosc, LINE, 15, LENG          ! Odczytuje fizyczna dlugosc
    linii nr 15
*GET, wmax, NODE, NUM, MAX             ! Zwraca najwyzszy numer wezla
    w aktualnym zbiorze
*VGET, wsp_x, NODE, 1, LOC, X, , , 2    ! Zapisuje do tablicy wsp_x
    wspolrzedna polozenia X
```

1.6 Zaawansowane techniki selekcji i filtrowania obiektów

Modyfikacja wybranego obszaru wymaga filtrowania bazy obiektów komendami KSEL (punkty), LSEL (linie), ASEL (powierzchnie), VSEL (bryły), ESEL (elementy) oraz NSEL (węzły).

Składnia selekcji węzłów po numerach oraz po geometrii:

```

NSEL, Typ, Node, , MIN, MAX, INK
NSEL, Typ, Loc, Wsp, MIN, MAX
ALLSEL, ALL                                ! Przywrocenie calego modelu do
      bazy danych

```

Gdzie Typ przyjmuje flagi: S (nowy wybór od zera), R (zawężenie obecnego wyboru), A (dodanie do wyboru), U (usunięcie ze zbioru). Argument Wsp to wskazanie osi współrzędnych: X, Y lub Z.

Składnia definicji sprzężonych list obiektów do operacji:

```

FLST, Pole, Liczba, Typ, Typ_listy, Dlugosc
FITEM, Pole, Numer

```

Dla Typ przyjmuje się wartości: 1 – węzły, 2 – elementy, 3 – keypointsy, 4 – linie, 5 – powierzchnie, 6 – bryły. Wielkość Typ_listy może mieć wartość NOOR lub ORDER. Dla zakresu obiektów można użyć ujemnego numeru w FITEM, np. FITEM,5,-13.

1.7 Wymuszenie podstawienia parametrów w ciągach tekstowych

Jeśli chcemy dynamicznie przekazywać wartości parametrów inżynierskich do nazw plików, opisów lub tytułów wykresów, zmienną umieszczamy pomiędzy znakami procentu (%).

```

a = 5
/TITLE, Rozklad temperatur dla t=%a%      ! Po odswiezeniu pojawi sie
      tytul z wartoscia 5

v = 1
SAVE, 'wersja_%v%', 'db'                  ! Zapisze plik pod nazwa
      wersja_1.db

```

Po zmianie wartości na v=2 kolejny zapis będzie miał automatycznie nazwę wersja_2.db.

1.8 Komendy Solwera (/SOL) oraz Plików Wejścia/Wyjścia

- Uruchomienie obliczeń jedno- i wielokrokowych:

```

/SOL                                ! Przejście do modulu
      rozwarzowania
SOLVE                                ! Wywołanie kroku
      obliczeniowego
LSWRITE, nr_kroku                    ! Zapis kroku obciazenia
      do pliku
LSSOLVE, min, max, inc               ! Sekwencyjne wykonanie
      zapisanych krokow

```

- Zapis bazy danych modelu oraz wyników:

```
SAVE, plik, rozszerzenie, sciezka, , lab
```

Gdzie lab przyjmuje opcje: ALL (pełny zapis), MODEL (zapis modelu geometrycznego, siatki i obciążeń) oraz SOLU (zapis modelu i wyników).

- Zapis pliku historii operacji (Log):

```
LGWRITE, plik, rozszerzenie, , opcje
```

Gdzie `opcje` zapisu komend to: `NONE` (zapis wszystkich poleceń), `COMMENTS` (komendy nieistotne jako komentarz) oraz `REMOVE` (komendy nieistotne są usuwane).

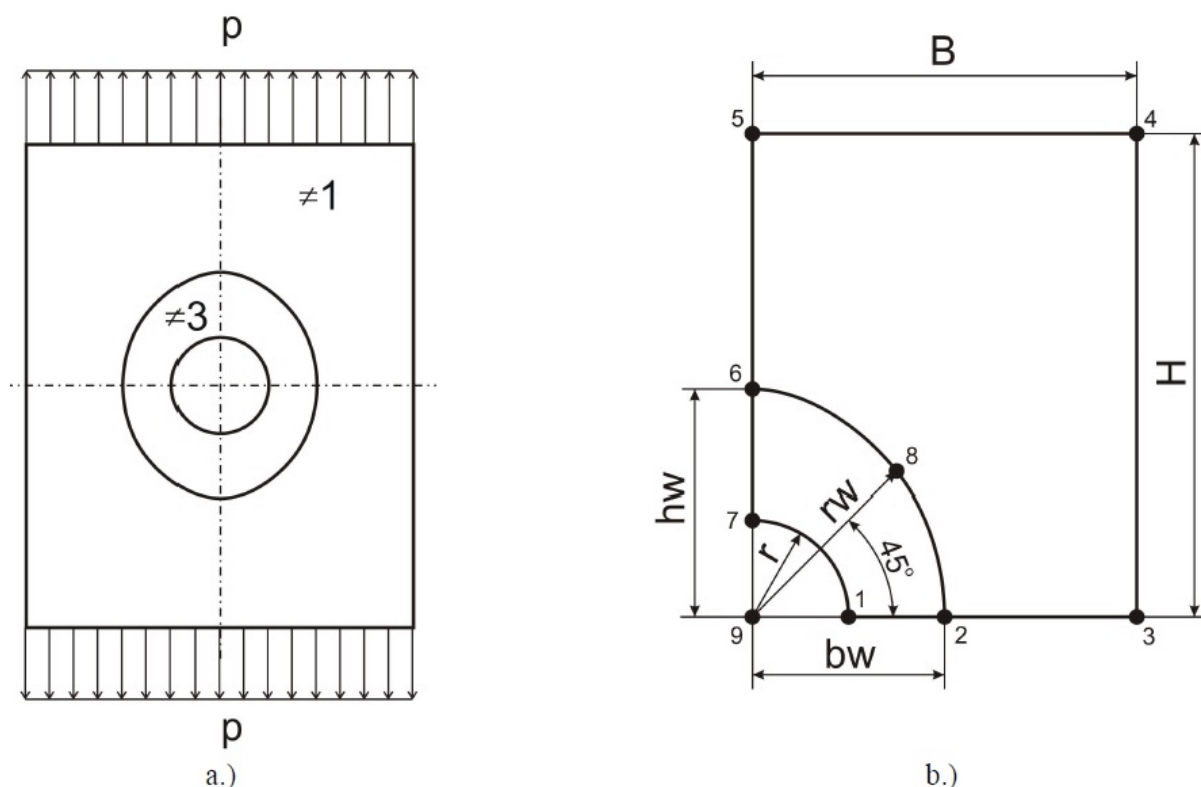
- **Wczytywanie skryptów zewnętrznych i makr:**

```
/INPUT, plik, rozszerzenie, , linia, LOG
```

2 Ćwiczenie praktyczne: Tarcza rozciągana ze wzmocnieniem

2.1 Opis zagadnienia

Rozciągana stalowa tarcza o grubości 1 mm posiada centralny otwór oraz lokalne wzmocnienie o grubości 3 mm (rys. 1a). Ze względu na dwie osie symetrii można zbudować model $\frac{1}{4}$ tarczy (rys. 1b). Model opisany jest w spójnym układzie jednostek [mm, N, MPa].



Rysunek 3: Analizowana tarcza i parametry opisujące jej kształt.

2.2 Część 1: Zdefiniowanie parametrów geometrycznych

Kształt geometryczny tarczy w preprocesorze opisują następujące parametry strukturalne:

$B = 60$	! Szerokosc tarczy
$H = 120$	! Wysokosc tarczy
$r = 20$	! Promien otworu centralnego
$bw = 30$	! Szerokosc wzmocnienia lokalnego
$hw = 35$	! Wysokosc wzmocnienia lokalnego
$rw = 40$	! Promien zewnetrzny wzmocnienia

2.3 Część 2: Budowa modelu geometrycznego (Metoda Bottom-Up)

Budowa struktury geometrycznej odbywa się metodą od dołu: najpierw tworzone są punkty kluczowe (Keypoints), następnie linie, a na końcu obszary powierzchniowe.

2.3.1 Otwarcie preprocesora strukturalnego

```
/PREP7
```

2.3.2 Utworzenie punktów kluczowych (Keypoints)

Przykład utworzenia punktu kluczowego nr 1 (argumentami polecenia są kolejno: indeks punktu oraz współrzędne kartezjańskie X, Y, Z):

```
K, 1, r, 0, 0
```

Operację należy powtórzyć dla wszystkich punktów węzłowych geometrii (oznaczonych kropkami na rysunku 2). Dla punktu nr 8 współrzędne wyznaczamy z jawnego wzoru trygonometrycznego, natomiast punkt nr 9 pokazuje, z której strony jest środek krzywizny łuków:

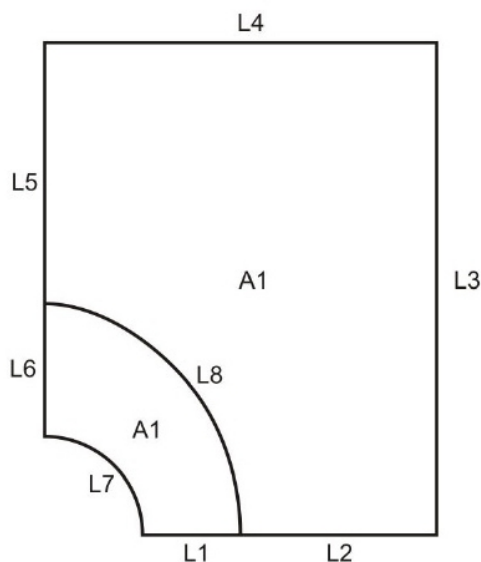
```
K, 8, rw/SQRT(2), rw/SQRT(2), 0
```

```
K, 9, 0, 0, 0
```

! Punkt pomocniczy - srodek

```
lukow kol
```

2.3.3 Utworzenie linii prostych



Rysunek 4: Numeracja linii (Lx) i powierzchni (Ax)

Linie na rys. 2 oznaczone są kolejno symbolami od L1 do L8. Komenda tworzenia linii prostych wymaga podania indeksu punktu początkowego oraz końcowego. Linie są automatycznie indeksowane w bazie danych w kolejności ich powstawania:

```
LSTR, 1, 2
```

2.3.4 Utworzenie łuków kołowych

Komenda wymaga zdefiniowania punktu startowego, końcowego, punktu środka krzywej oraz promienia projektowego łuku kół:

```
LARC, 1, 7, 9, r
```

2.3.5 Utworzenie linii typu Spline

Na granicy strefy wzmocnienia tworzymy gładką krzywą typu spline. W komendzie podajemy maksymalnie 6 punktów, przez które ma ona przechodzić (w tym przypadku tylko 3, stąd puste pola rozdzielone przecinkami) oraz składowe wektorów stycznych na jej krańcach:

```
BSPLIN, 2, 8, 6, , , , 0, -1, 0, -1, 0, 0
```

2.3.6 Utworzenie obszarów powierzchniowych z pętli linii

W poleceniu tworzącym powierzchnie z linii (AL) podajemy numery linii składowych, które muszą tworzyć zamknięty, nieprzerwany i geometrycznie spójny kontur krawędziowy:

```
AL, 1, 6, 7, 8  
AL, 2, 3, 4, 5, 8
```

2.4 Budowa modelu elementów skończonych

2.4.1 Zdefiniowanie właściwości materiałowych

Określenie liczby kroków temperaturowych, dla których będą określane właściwości materiałowe (w tym przypadku 1) oraz zadanie modułu Younga (EX) i współczynnika Poissona (PRXY) dla materiału nr 1:

```
MPTEMP, 1, 0  
MPDATA, EX, 1, , 2E5  
MPDATA, PRXY, 1, , 0.3
```

Wartość 1 będąca drugim argumentem funkcji MPDATA definiuje przypisany numer materiału w budowanym modelu numerycznym.

2.4.2 Wybór typu elementu skończonego i opcji kluczowych

Wybieramy do użycia strukturalny element dwuwymiarowy PLANE182 i przypisujemy mu indeks identyfikacyjny nr 1 w modelu:

```
ET, 1, PLANE182
```

W opcjach kluczowych elementu (gdzie argumenty komendy to kolejno: nr zadeklarowanego elementu, nr opcji kluczowej, wartość opcji) ustawiamy płaski stan naprężenia z zadaną grubością (KEYOPT(3)=3):

```
KEYOPT, 1, 3, 3
```

oraz wybieramy zaawansowany sposób całkowania powierzchniowego typu „Enhanced Strain” (KEYOPT(1)=2):

```
KEYOPT, 1, 1, 2
```

2.4.3 Ustawienie stałych rzeczywistych i przypisanie atrybutów

Zadeklarowanie grubości fizycznej realizujemy za pomocą zestawu stałych rzeczywistych (zestaw R nr 1 = 1 mm dla tarczy bazowej, zestaw nr 2 = 3 mm dla obszaru wzmocnionego):

```
R, 1, 1  
R, 2, 3
```

Atrybuty strukturalne (materiał, element skończony, stałe rzeczywiste) przypisuje się wybranym powierzchniom selektywnie. W tym celu należy najpierw użyć komendy wyboru geometrycznej powierzchni (ASEL), a następnie jawnego polecenia przypisania atrybutów (AATT). Domyślnie program stosuje stałe o numerze 1:

```
ASEL, , , , 1  
AATT, 1, 2, 1, ,
```

Po zakończeniu przypisywania atrybutów lokalnych należy bezwzględnie przywrócić widoczność i wybór wszystkich powierzchni modelu w bazie danych:

```
ALLSEL, ALL
```

2.5 Generowanie siatki elementów skończonych

Najpierw definiujemy gęstość podziałów krawędziowych na liniach, narzucając liczbę elementów za pomocą komendy LESIZE. Przyjmijmy 10 podziałów dla linii 1, 2, 5, 6, 7, 8 oraz 20 podziałów dla linii 3, 4:

```
LESIZE, 1, , , 10  
LESIZE, 3, , , 20
```

Następnie generujemy siatkę elementów skończonych. Dla powierzchni nr 1 stosujemy siatkę strukturalną regularną (parametr sterujący MSHKEY ma wartość 1), a dla powierzchni nr 2 siatkę swobodną (wartość 0):

```
MSHKEY, 1  
AMESH, 1  
MSHKEY, 0  
AMESH, 2
```

2.6 Warunki brzegowe i obciążenia konstrukcji

2.6.1 Definicja warunków symetrii

Na dolnej i lewej krawędzi modelu (linie 1, 2, 5 i 6) zadajemy warunki symetrii za pomocą flagi SYMM:

```
DL, 1, , SYMM
```

2.6.2 Obciążenie ciśnieniem zewnętrznym

Do górnej krawędzi modelu (linia krawędziowa nr 4) przykładamy równomierne obciążenie rozciągające, realizowane w systemie poprzez ujemną wartość ciśnienia:

```
SFL, 4, PRES, -10
```

2.7 Uruchomienie obliczeń strukturalnych (Solver)

Wejście do dedykowanego bloku procesora rozwiązywania oraz uruchomienie obliczeń macierzowych dla aktualnego kroku obciążeń:

```
/SOL  
SOLVE
```

2.8 Postprocessing i prezentacja wyników

Wejście do ogólnego postprocesora i załadowanie pierwszego dostępnego zbioru wyników:

```
/POST1  
SET, FIRST
```

Zapis obrazów z wynikami do plików JPEG. Aby zapisać wykresy w formacie JPEG, po każdym wywołaniu komendy rysującej należy przekierować strumień graficzny do pliku:

```
/SHOW, JPEG, , 0  
/REPLOTT  
/SHOW, CLOSE
```

lub zawrzeć komendy tworzące obraz pomiędzy tymi, które opisują otwarcie pliku graficznego i jego zamknięcie:

```
/SHOW, JPEG, , 0  
!tu wstawiamy komendy rysujące obraz  
/SHOW, CLOSE
```

W tym drugim wariancie pomijamy wyświetlanie obrazu na ekranie. W obydwu metodach wszystkie tworzone pliki graficzne będą miały nazwy w postaci `jobnamexxx.jpg`, gdzie `xxx` to kolejny numer zaczynając od **000**.

Wygenerowanie map konturowych na modelu. Drugi argument poniższych funkcji definiuje kategorię danych (np. **U** – przemieszczenia, **S** – naprężenia, **EPT0** – odkształcenia całkowite), natomiast trzeci określa konkretną składową (**X**, **Y**, **Z** – składowe kierunkowe, **1**, **2**, **3** – naprężenia główne, **EQV** – naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky’ego):

```
PLNSOL, U, Y, 0  
PLNSOL, S, EQV, 0
```

Definicja ścieżki badawczej (Path). Identyfikacja numerów węzłów początku oraz końca ścieżki pomiarowej na podstawie ich współrzędnych geometrycznych w modelu:

```
node_1 = NODE(rw, 0, 0)  
node_2 = NODE(B, 0, 0)
```

Inicjalizacja ścieżki o nazwie **sciezka1** wraz z przypisaniem zidentyfikowanych węzłów granicznych:

```
PATH, sciezka1, 2, 30, 100  
PPATH, 1, node_1  
PPATH, 2, node_2
```

Mapowanie naprężeń na ścieżkę. Jako parametr **Sx** zostaną zapisane naprężenia poziome, jako **Sy** naprężenia pionowe, a jako **Sred** naprężenia zredukowane. Dane interpolowane są na ścieżkę w postaci uśrednionej pomiędzy sąsiadującymi elementami skończonymi (**AVG**):

```
PDEF, Sx, S, X, AVG
PDEF, Sy, S, Y, AVG
PDEF, Sred, S, EQV, AVG
```

Wygenerowanie i wyświetlenie wykresu liniowego dla zmapowanych wielkości wzdłuż zdefiniowanej ścieżki:

```
PLPATH, Sx, Sy, Sred
```

2.9 Zadania laboratoryjne do wykonania

1. Napisać parametryczne skrypty APDL tworzące model numeryczny tarczy, wykonujące obliczenia MES oraz automatyczną obróbkę wyników w postprocesorze. Jako wyniki końcowe wygenerować mapy składowych przemieszczeń pionowych oraz naprężeń zredukowanych von Misesa, a także wykresy liniowe naprężeń σ_x , σ_y i σ_{red} wzdłuż zadanych linii pomiarowych 1–3 oraz 7–5. Zweryfikować stabilność działania skryptu dla różnych wartości parametrów wejściowych.
2. Zmodyfikować skrypt poprzez implementację filtrów logicznych zabezpieczających model przed wprowadzeniem błędnych wartości wymiarów b_w , h_w i r_w . W przypadku wykrycia konfiguracji geometrycznej, która spowodowałaby wyjście strefy wzmocnienia poza gabaryty tarczy, algorytm ma automatycznie nadpisać parametry i przyjąć bezpieczną, odpowiednio mniejszą wartość graniczną.
3. Zbudować strukturę skryptu sterującego, która automatycznie wykrywa proporcje tarczy: w przypadku, gdy szerokość przekracza wysokość ($B > H$), program ma dokonać automatycznej rekonfiguracji i zmienić kierunek obciążenia rozciągającego z pionowego na poziomy.
4. Opracować procedurę automatycznego siatkowania, w której długość liniowa krawędzi elementów skończonych na liniach pomiarowych 1–3 oraz 7–5 pozostaje niezmienna (stała gęstość siatki). Liczba podziałów elementów na liniach składowych 1–2, 2–3, 7–6 i 6–5 musi być obliczana dynamicznie w kodzie na podstawie ich aktualnej długości fizycznej.
5. Zaimplementować pętlę obliczeniową badającą wpływ promienia wzmocnienia r_w (zmieniającego się krokami od wartości minimalnej do maksymalnej) na stan wyężenia konstrukcji. Skrypt ma automatycznie zapisywać maksymalną wartość naprężenia zredukowanego z każdego kroku do dedykowanej tablicy parametru tablicowego typu `ARRAY`, a powiązane mapy konturowe i wykresy eksportować do osobnych plików `.grph` o nazwach indeksowanych numerem bieżącej iteracji pętli.