

LABORATORIUM NUMERYCZNE MECHANIKI KONSTRUKCJI

Optymalizacja parametryczna w środowisku ANSYS

1 Ogólna teoria optymalizacji parametrycznej

Procedura optymalizacyjna w środowisku ANSYS stanowi sformalizowany, matematyczny proces poszukiwania najlepszego rozwiązania inżynierskiego na podstawie zdefiniowanego, parametrycznego modelu numerycznego. Program traktuje model MES jako czarną skrzynkę, która dla określonych parametrów wejściowych wyznacza wartości odpowiedzi konstrukcji.

Z punktu widzenia algorytmicznego, ogólny problem optymalizacji definiowany jest za pomocą trzech głównych grup wielkości parametrycznych:

1. **Parametry wejściowe / Zmienne decyzyjne (DV – *Design Variables*):** Niezależne parametry geometryczne, materiałowe lub obciążeniowe, które algorytm może modyfikować w celu znalezienia rozwiązania optymalnego. Każda zmienna musi mieć jasno określone granice fizycznej dopuszczalności:

$$x_{i,min} \leq x_i \leq x_{i,max} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

2. **Parametry wyjściowe / Ograniczenia stanu (SV – *State Variables*):** Parametry zależne, które stanowią kryteria poprawności konstrukcji (np. dopuszczalne naprężenia, ugięcia lub częstotliwości drgań). Określają one przestrzeń rozwiązań dopuszczalnych:

$$g_{j,min} \leq g_j(\mathbf{x}) \leq g_{j,max} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

3. **Funkcja celu (OBJ – *Objective Function*):** Wielkość skalarna, która podlega procesowi minimalizacji bądź maksymalizacji (np. minimalizacja masy całkowitej konstrukcji):

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \min/\max \quad (3)$$

Środowisko obliczeniowe ANSYS oferuje szeroki katalog algorytmów optymalizacyjnych. Wybór konkretnego narzędzia determinuje sposób przeszukiwania przestrzeni projektowej oraz koszt obliczeniowy. Poniżej scharakteryzowano dwie fundamentalne metody reprezentujące podejście tradycyjne oraz nowoczesne środowisko Workbench.

1.1 Klasyczna Metoda Przybliżeń Podproblemów (*Subproblem Approximation Method*)

Metoda ta, wywodząca się z klasycznego środowiska ANSYS (Mechanical APDL), opiera się na koncepcji tworzenia uproszczonych metamodeli. Solver nie odwołuje się bezpośrednio do rzeczywistej, kosztownej obliczeniowo pętli MES przy każdej wewnętrznej iteracji matematycznej, lecz buduje jej statyczne przybliżenie analityczne (powierzchnię

odpowiedzi).

Zasada działania:

- **Próbkowanie wstępne:** Algorytm wyznacza zestaw punktów startowych (ang. *design sets*) w przestrzeni zmiennych decyzyjnych i wykonuje dla nich pełne analizy MES.
- **Budowa aproksymacji:** Na podstawie uzyskanych wyników, za pomocą metody najmniejszych kwadratów, solver dopasowuje funkcję aproksymującą (zazwyczaj wielomian niskiego stopnia) dla funkcji celu oraz dla każdej zmiennej stanu:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

- **Optymalizacja na modelu zastępczym:** Właściwe poszukiwanie minimum odbywa się bardzo szybko na czysto matematycznej funkcji wielomianowej $\hat{f}(\mathbf{x})$, bez uruchamiania solvera MES.
- **Weryfikacja:** Wyznaczony teoretyczny punkt optymalny jest sprawdzany pojedynczym, realnym rozwiązaniem MES w celu weryfikacji błędu. Proces powtarza się w zadanych granicach aż do osiągnięcia kryterium zbieżności.

Metoda ta charakteryzuje się dużą szybkością działania i odpornością na lokalne zaszumienie wyników (np. błędy siatkowania), jednak słabo radzi sobie z silnie nieliniowymi zjawiskami fizycznymi ze względu na sztywne ramy matematyczne wielomianów.

1.2 Algorytm NLPQL w środowisku ANSYS Workbench (*Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian*)

Algorytm NLPQL reprezentuje nowoczesne podejście do optymalizacji bezpośredniej (*Direct Optimization*) w module ANSYS DesignXplorer. Jest to zaawansowana, matematyczna metoda pierwszego rzędu, która rezygnuje z globalnych modeli zastępczych na rzecz precyzyjnego i rygorystycznego poszukiwania lokalnego za pomocą wielkości gradientowych.

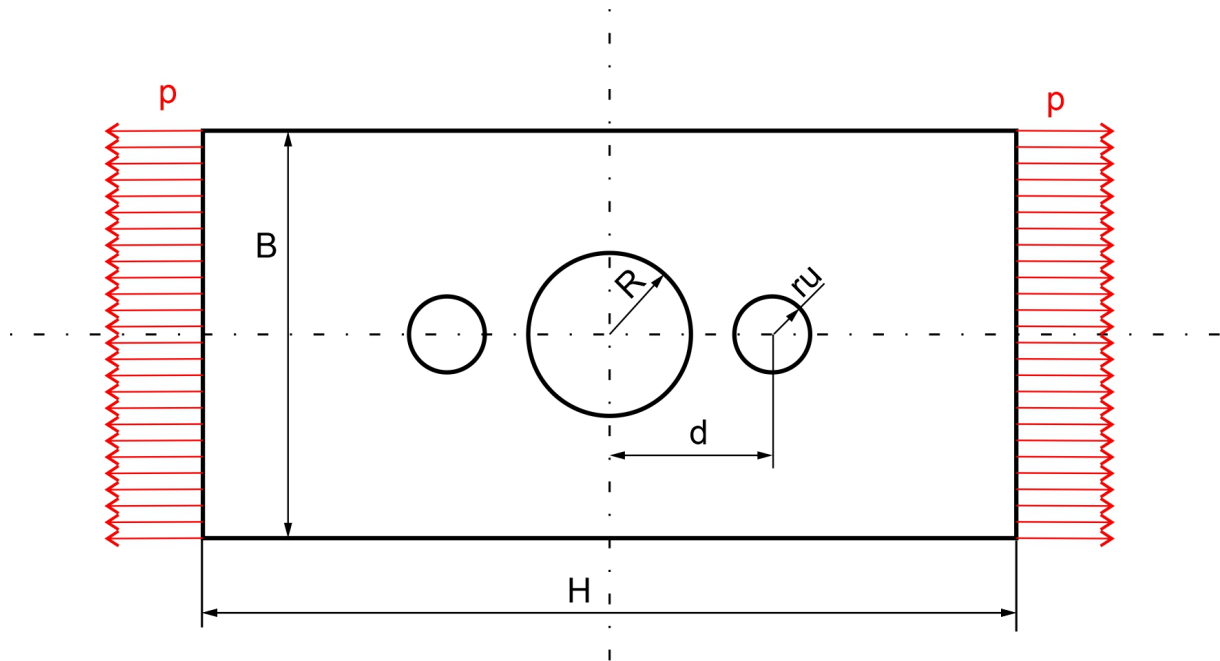
Zasada działania:

- **Wielokrotne badanie wrażliwości:** W aktualnym punkcie projektowym algorytm wyznacza pochodne cząstkowe (gradienty) funkcji celu oraz ograniczeń stanu względem wszystkich zmiennych decyzyjnych (∇f). Odbywa się to poprzez różnicowanie skończone – program wykonuje serię ukrytych rozwiązań MES, celowo wprowadzając minimalne perturbacje wymiarów, aby zbadać czułość modelu.
- **Kwadratowy podproblem optymalizacyjny:** W każdej iteracji algorytm generuje uproszczony, kwadratowy podproblem optymalizacyjny z linearyzacją ograniczeń (Metoda SQP), co pozwala na matematyczne wyznaczenie precyzyjnego kierunku najszybszego spadku funkcji celu.
- **Sztywne przestrzeganie ograniczeń:** NLPQL dąży do rozwiązania w sposób bezwzględny respektujący zdefiniowane kryteria konstrukcyjne (*Strict Feasibility*). Punkty, które trwale naruszają nałożone ograniczenia (np. dopuszczalne naprężenia), są natychmiastowo odrzucane.

NLPQL charakteryzuje się najwyższą dokładnością matematyczną i gwarantuje znalezienie zbieżnego, optymalnego rozwiązania w pobliżu punktu startowego. Wymaga jednak znacznych zasobów obliczeniowych, ponieważ każda iteracja dla n zmiennych wejściowych generuje wielokrotne, bezpośrednie uruchomienia solvera MES do samego obliczenia macierzy gradientów. Wykazuje również tendencję do utykania w lokalnych minimach przestrzeni projektowej, jeżeli punkt startowy został dobrany zbyt daleko od globalnego optimum.

2 Optymalizacja tarczy z otworami odciążającymi

Przedmiotem analizy szczegółowej w ramach niniejszego ćwiczenia jest płaska tarcza o wysokości $H = 100$ mm, szerokości $B = 50$ mm i grubości $g = 1$ mm, osłabiona centralnym otworem o promieniu $R = 10$ mm. Tarcza wykonana jest z duraluminium, które charakteryzuje się modułem Younga $E = 7 \cdot 10^4$ MPa) oraz współczynnikiem Poissona $\nu = 0.34$. Konstrukcja poddana jest obustronnemu, równomiernemu rozciąganiu ciśnieniem o wartości $p = 10$ MPa. Zjawisko spiętrzenia naprężeń na brzegu centralnego otworu (karbu) redukowane jest poprzez wprowadzenie dwóch symetrycznych, pomocniczych otworów odciążających o promieniu r_u , rozsuniętych o dystans d od geometrycznego środka układu.



Rysunek 1: Geometria tarczy z centralnym otworem oraz otworami odciążającymi o promieniu r_u w odległości d .

2.1 Sformułowanie matematyczne problemu

Zadanie optymalizacji strukturalnej polega na znalezieniu takiego wektora parametrów geometrycznych $\mathbf{x} = [r_u, d]^T$, który zminimalizuje spiętrzenie naprężeń zredukowanych wokół otworu głównego, nie powodując jednocześnie niebezpiecznego wzrostu naprężeń w strefie otworów pomocniczych ani kolizji geometrycznej.

Formułujemy problem optymalizacyjny w terminach zmiennych systemu ANSYS MAPDL:

$$\text{Funkcja celu (OBJ): } f(r_u, d) = \sigma_{max}(r_u, d) \rightarrow \min \quad (5)$$

$$\text{Zmienne decyzyjne (DV): } r_{u,min} \leq r_u \leq r_{u,max} \quad (6)$$

$$d_{min} \leq d \leq d_{max} \quad (7)$$

$$\text{Zmienne ograniczeń (SV): } g_1(r_u, d) = d - r_u - R > 0 \quad (\text{brak przecinania otworów}) \quad (8)$$

$$g_2(r_u, d) = \frac{H}{2} - d - r_u > 0 \quad (\text{otwór wewnątrz tarczy}) \quad (9)$$

2.2 Metodyka realizacji obliczeń w MAPDL

W ramach ćwiczenia proces optymalizacji parametrycznej zostanie wykonany na trzy odmienne sposoby, co pozwoli porównać tradycyjne techniki programistyczne z dedykowanymi algorytmami matematycznymi programu ANSYS.

2.2.1 Zadanie parametrów, budowa geometrii oraz siatki elementów skończonych

Wspólnym mianownikiem dla obu rozpatrywanych podejść optymalizacyjnych („ręcznej” pętli oraz wbudowanego modułu /OPT) jest tworzenie definicji fizycznej i dyskretyzacja modelu. Poniższy podrozdział szczegółowo omawia uniwersalny blok kodu APDL realizujący te kroki.

Po otwarciu preprocesora (/PREP7) definiowane są niezmiennie gabaryty tarczy, promień otworu głównego :

```
H = 100      ! Szerokosc tarczy [mm]
B = 50       ! Wysokosc tarczy [mm]
R = 10       ! Staly promien glownego otworu [mm]
```

Definiowane są także aktualne bądź początkowe wartości promienia otworu pomocniczego i parametr określający jego położenie.

```
RU=5
D=20
```

oraz wyznaczane są geometryczne kryteria bezpieczeństwa

```
G_1 = D-R-RU
G_2 =H/2-(D+RU)
```

Ze względu na symetrię konstrukcji i obciążenia zamodelowana może być tylko połowa struktury. Modelowanie geometryczne realizowane jest z wykorzystaniem prymitywów i operacji boolowskich:

```
/PREP7
RECT, 0, H/2, -B/2, B/2      ! Tworzenie tarczy
CYL4, 0, 0, R                ! Glowny otwor centralny
CYL4, d, 0, RU               ! otwor odciazaajacy
```

W celu uzyskania finalnego obszaru tarczy z otworami, konieczne jest przeprowadzenie operacji boolowskich polegających na odjęciu powierzchni kół od prostokąta:

```
ASBA, 1, ALL
```

Analiza prowadzona jest w płaskim stanie naprężenia (*Plane Stress*). W tym celu wykorzystano czworoboczny, 4-węzłowy element strukturalny PLANE182 wraz z odpowiednim ustawieniem opcji kluczowych (KEYOPT):

```
ET, 1, PLANE182          ! Element powierzchniowy 2D
KEYOPT, 1, 3, 0          ! Płaski stan naprężenia (Plane
    stress)
KEYOPT, 1, 1, 2          ! Enhanced strain
MP, EX, 1, 7E4           ! Modul Younga duraluminium [MPa]
MP, NUXY, 1, 0.34        ! Współczynnik Poissona
```

Dyskretyzacja obszaru odbywa się automatycznie przy użyciu inteligentnego algorytmu dopasowania gęstości siatki (SMRT, 3), który zagęszcza elementy skończone w strefach występowania karbów (wokół krawędzi otworów), gdzie spodziewane są silne gradienty naprężeń:

```
SMRT, 3                  ! Inteligentne zagęszczenie siatki
    (poziom gesty)
AMESH, ALL                ! Generowanie siatki elementów
    skonczonych
```

Na lewej krawędzi modelu zadajemy warunki symetrii (SYMM) oraz w narożu w lewym dolnym narożu odbieramy swobodę przemieszczeń na kierunek pionowy (UY). Obciążenie rozciągające o wartości 10 MPa realizowane jest poprzez przyłożenie ujemnego ciśnienia na prawej krawędzi (odpowiednie obiekty geometrii wybierane na podstawie ich lokalizacji):

```
LSEL, S, LOC, X, 0 !Wybor linii lezacych na wspolrzednej x=0
DL, ALL, , SYMM    !nadanie warunku symetrii

KSEL, S, LOC, X, 0 !Wybor keypointsow o wspolrzednej x=0
KSEL, R, LOC, Y, -B/2 !Wybor KP o y=-B/2 sposrod poprzednio wybranych
DK, ALL, UY, 0      !zablokowanie przemieszczenia pionowego

LSEL, S, LOC, X, H/2 !wybor linii na wspolrzednej x=h/2
SFL, ALL, PRESS, -10 !nadanie obciazenia rozciagajacego
ALLSEL
```

2.2.2 Podejście A: „Ręczne” poszukiwanie optymalnego kształtu w pętli (*DO)

Metoda ta wykorzystuje makra sterujące języka APDL bez uruchamiania wewnętrznego solvera optymalizacyjnego. Założony jest zakres zmienności parametrów ru oraz di przeszukany zbiór wyników dla wszystkich dopuszczalnych kombinacji. Kod realizujący te obliczenia powinien być zbudowany wg poniższego schematu:

2.2.2.1 Komendy inicjujące - poza pętlą optymalizacyjną

Otwarcie preprocesora i definicja parametrów globalnych:

- definicja stałych parametrów opisujących geometrię jak w rozdziale 2.2.1
- definicja parametru przechowujący minimalną uzyskaną wartość naprężeń i przypisanie mu dużą wartość początkową (wykraczającą poza realny zakres) np.

```
SRED_OPT=1E10
```

- definicja parametrów odpowiadających optymalnym wartościom promienia otworu odciażającego i jego położenia z przypisaniem początkowych wartości zerowych:

```
RU_OPT=0
D_OPT=0
```

Wybór typu elementu, definicja materiału, ustawienia siatki
 Powyższe zgodnie z opisem w rozdziale 2.2.1

2.2.2.2 Komendy pętli optymalizacyjnej

Inicjalizacja pętli po wartościach promienia otworu odciażającego i jego położenia

```
*DO, RU, 3, 15, 1      ! Petla po promieniu otworu odciazeniowego
  *DO, D, 11, 45, 1    ! Petla po dystansie srodkow otworow
```

Otwarcie preprocesora.

Obliczenie i sprawdzenie parametrów kontrolnych G_1 i G_1. W przypadku niespełnienia warunków bezpieczeństwa dana pętla iteracyjna może zostać przerwana komendą:

```
*CYCLE
```

Budowa modelu elementów skończonych (geometria, siatka, obciążenia) dla aktualnych parametrów wg rozdziału 2.2.1.

Wykonanie obliczeń:

```
/SOLU
SOLVE
```

Odczytanie maksymalnej wartości naprężeń zredukowanych dla aktualnych parametrów:

```
/POST1                      !otwarcie postprocesora
SET,1,1                      ! Wczytanie podkroku obliczen
NSORT,S,EQV                  !Odczyt wartosci wezlowych naprezen
zredukowanych
*GET,SRED_MAX,SORT,,MAX      !Zapisanie wartosci maksymalnej
```

Sprawdzenie, czy aktualna wartość maksymalnych naprężeń zredukowanych SRED_MAX jest niższa niż dotychczasowa najniższa SRED_OPT. Jeśli warunek jest spełniony zamiana wartości i zapis wartości optymalnych RU_OPT i D_OPT

```
*IF,SRED_MAX,LT,SRED_OPT,THEN
  SRED_OPT=SRED_MAX
  RU_OPT=RU
  D_OPT=D
*ENDIF
```

Wyczyszczenie obszaru roboczego przed kolejną iteracją

```
/PREP7
ACLEAR, ALL                  ! Czyszczenie siatki elementow
ADELE, ALL,,1               ! Usuwanie geometrii
NUMCMP,ALL                  !Wymuszenie ponownej numeracji
obekiektow od 1
```

Zamknięcie pętli iteracyjnych

```
*ENDDO  
*ENDDO
```

2.2.2.3 Zapisanie wartości optymalnych do pliku tekstowego

```
/POST1  
/OUTPUT, wynik_optymalizacji, txt !Przekierowanie strumienia tekstowego  
do pliku  
*STATUS, SRED_OPT  
*STATUS, RU_OPT  
*STATUS, D_OPT  
/OUTPUT !Przywrocenie domyslnego wyswietlania na ekran
```

2.2.3 Metoda Aproksymacji Podprzestrzeni

Metoda aproksymacji podprzestrzeni to obecnie jedyna metoda optymalizacji dostępna w klasycznym środowisku Ansysa. Jej zastosowanie wymaga stworzenia dwóch plików.

2.2.3.1 Plik z optymalizowanym modelem

Pierwszy z nich o nazwie np. np. model.txt musi zostać zawierać procedury tworzące model przygotowane w sposób opisany w rozdziale 2.2.1. Muszą być w nim także zainicjowane obliczenia (\SOLVE) oraz odczytana wartość funkcji celu (w naszym przypadku maksymalnych naprężeń zredukowanych SRED_MAX). Na koniec umieszczamy komendy czyszczące siatkę i usuwające geometrię. Powinny być one zawarte w instrukcji warunkowej sprawdzającej, czy optymalizacja została zakończona

```
*IF,CZYSC,NE,0,THEN  
!Parametr CZYSC przyjmuje wartosc rozna od 0 w petli optymalizacyjnej  
!Parametr CZYSC=0 po zakonczeniu optymalizacji  
/PREP7  
ACLEAR, ALL  
ADELE, ALL, , , 1  
*ENDIF
```

2.2.3.2 Właściwy plik optymalizacji

Drugi z plików wywołuje właściwe komendy optymalizacyjne, a jego struktura powinna być następująca:

```
/CLEAR, NOSTART  
  
! Inicjalizacja wartosci startowych parametrow sterujacych, zmiennych  
projektowych (DV) i funkcji celu (OBJ)  
CZYSC=100  
RU=10  
D=30  
SRED_MAX=0
```

```

!Otwarcie modulu optymalizacji
FINISH
/OPT
OPCLR

!Przypisanie pliku z optymalizowanym modelem
OPANL,model,txt

!Deklaracja Zmiennych Projektowych (DV) i ustalenie granic ich
    zmiennosci
OPVAR, RU, DV, 6, 10
OPVAR, D, DV, 15, 35

!Deklaracja Zmiennych Stanu (SV) i ustalenie dolnej granicy
OPVAR, RU, DV, 6, 10
OPVAR, D, DV, 15, 35

!Deklaracja Funkcji Celu (OBJ)
OPVAR,SRED_MAX,OBJ

!wybor typu optymalizacji
OPTYPE, SUBP
!ustawienie maksymalnej liczby iteracji optymalizacyjnych (200)
!ustawienie dopuszczalnej liczby kolejnych iteracji niepoprawnych (15)
OPSUBP, 200, 15

!URUCHOMIENIE OPTYMALIZACJI
OPEXE

!ODBUDOWA MODELU DLA OPTYMALNYCH PARAMETROW I ZAPIS WYNIKOW
    OPTYMALIZACJI

FINISH

!Wczytanie pliku modelu dla parametrow optymalnych
CZYSC=0
/INPUT,model,txt

/POST1
/OUTPUT, wynik_optymalizacji_sub, txt
*STATUS,SRED_MAX
*STATUS,RU
*STATUS,D
/OUTPUT

```

Tak przygotowany plik trzeba wczytać do Ansysa.

2.2.4 Metoda NPQL

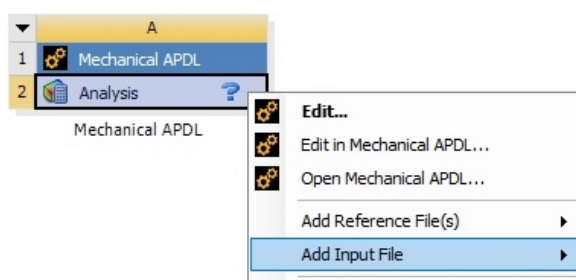
Do symulacji drugą z opisanych metod zastosowane zostanie podejście hybrydowe. Dyskretyzacja i parametryzacja modelu zostanie wykonana w środowisku Mechanical APDL, a algorytm optymalizacyjny uruchomiany w środowisku Workbench.

2.2.4.1 Plik modelu

Plik modelu należy przygotować analogicznie jak dla poprzedniego wariantu. Różnice między plikami polegają na konieczności uwzględnienia definicji zmiennych projektowych D i RU (najlepiej przypisać im początkowo wartości zbliżone do optymalnych, uzyskanych w poprzednim etapie) oraz pominięcia komend czyszczących bazę danych.

2.2.4.2 Działania w Workbenchu

1. Dodanie do projektu modułu Mechanical APDL i wczytanie stworzonego uprzednio pliku z modelem.



2. W bloku Outline of schematic kliknięcie na nazwę wczytanego pliku pozwala zdefiniować parametry wejścia (promień i położenie otworu ulżeniowego) i wyjścia (parametry ograniczające położenie okręgu oraz maksymalne naprężenia zredukowane).

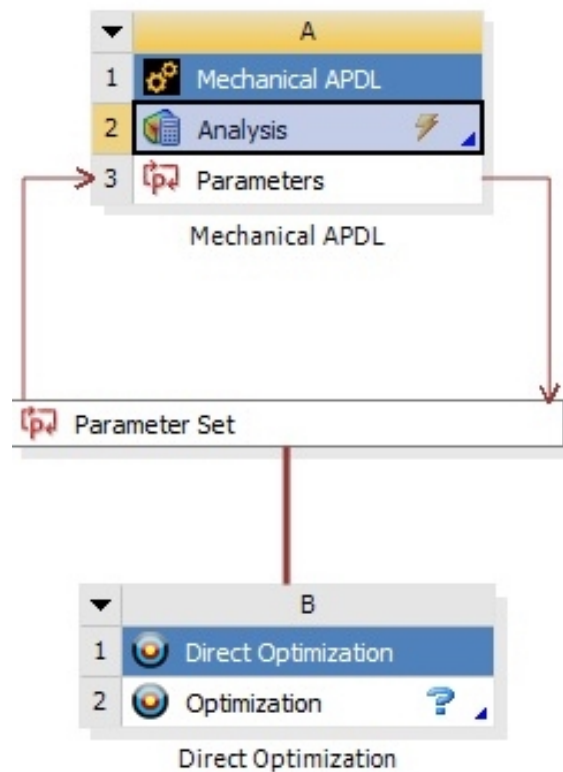
Outline of Schematic A2 : Mechanical APDL

	A	B
1		Step
2	 Launch ANSYS	1
3	 Process "model_w.txt"	2

Properties: No data

	A	B	C	D
1	APDL Parameter ▼	Initial Value	Input	Output
2	H	100	☐	☐
3	B	50	☐	☐
4	R	10	☐	☐
5	RU	8	☒	☐
6	D	23	☒	☐
7	G_1		☐	☒
8	G_2		☐	☒
9	SRED_MAX		☐	☒

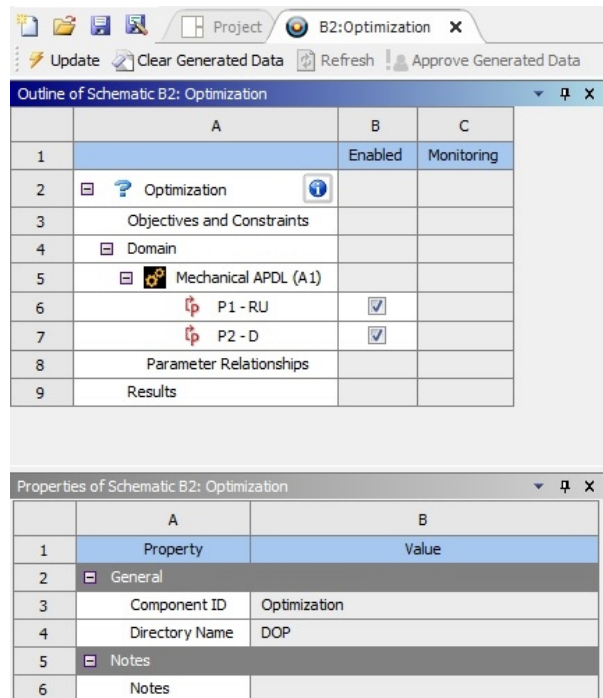
3. Dodanie do projektu modułu optymalizacji Direct optimization. Powinien on połączyć się automatycznie z parametrami modelu.



4. Kliknięcie na Optimization otworzy okno jej właściwości. Method Selection przełączamy na Manual, po czym Method Name ustawiamy jako NLPQL.

Properties of Outline : Optimization		
	A	B
1	Property	Value
2	Design Points	
3	Preserve Design Points After DX Run	☐
4	Failed Design Points Management	
5	Number of Retries	0
6	Optimization	
7	Method Selection	Manual
8	Method Name	NLPQL

5. Dwuklik na Optimization otworzy poniższą zakładkę



- Kliknięcie na pole B3 Objectives and Constraints pozwoli ustawić role parametrów wyjściowych i nadać im ograniczenia.

Table of Schematic B2: Optimization									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	Name	Parameter	Objective	Constraint					
2			Type	Target	Tolerance	Type	Lower Bound	Upper Bound	Tolerance
3	P3 >= 1,5	P3 - G_1	No Objective			Values >= Lower Bound	1,5		0,001
4	P4 >= 1,5	P4 - G_2	No Objective			Values >= Lower Bound	1,5		0,001
5	Minimize P5	P5 - SRED_MAX	Minimize	26		No Constraint			
*	Select a Parameter								

W przypadku funkcji celu ustawiamy wartość, do której dążymy (Target) jako nieco niższą, od oczekiwanej wartości naprężeń. Jeśli tego nie zrobimy program za cel przyjmie ich wyzerowanie, co z oczywistych względów nie jest możliwe.

- Uruchomienie optymalizacji - przycisk Update w lewym rogu górnego menu.
- Po wykonaniu obliczeń można obejrzeć wyniki - wartości parametrów dla punktów typowanych na optymalne.

Table of Schematic B2: Optimization , Candidate Points											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
1	Reference	Name	P1 - RU	P2 - D	P3 - G_1	P4 - G_2	P5 - SRED_MAX				
2					Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	
3	Starting Point	DP 0	8	23	5	0,00%	19	0,00%	29,763	0,00%	
4	Candidate Point 1		8,1651	22,493	4,3282	-13,44%	19,342	1,80%	29,094	-2,25%	
5	Candidate Point 2		8,1568	22,484	4,3275	-13,45%	19,359	1,89%	29,664	-0,33%	
6	Candidate Point 3	DP 0	8	23	5	0,00%	19	0,00%	29,763	0,00%	
*	New Custom Candidate Point										

2.3 Wyniki

Dla każdej z metod należy przedstawić geometrię dla parametrów optymalnych oraz odpowiadający im rozkład naprężeń zredukowanych. W sprawozdaniu należy również pokazać przykładowe geometrie nieoptymalne wraz z rozkładami naprężeń.